

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 11 (179)
ноябрь

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г.** Роль технологической совместимости в создании эффективных покрытий и слоев на поверхностях деталей машин 483
- Михальченков А.М., Феськов С.А., Козарез И.В., Локтев А.А.** Исследование микротвердости и микроструктуры компенсирующих элементов и импортных культиваторных лап при их упрочняющем восстановлении 489



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Зайдес С.А., Фам Ван Ань.** Влияние кинематики рабочего инструмента при локальном нагружении на напряженное состояние поверхностного слоя 493
- Овсенко А.Н., Клауч Д.Н., Носов Д.П., Пономарёв А.А.** Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы 498
- Щедрин А.В., Алешин В.Ф., Бугаев А.М., Миняева Л.Х., Чихачёва Н.Ю.** Теоретико-экспериментальное исследование и совершенствование методов дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях противодавления технологических смазок 501



ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.** Вакуумное упрочнение одно- и двухкарбидных твердых сплавов 506



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Лебедев В.А., Лой С.А., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В.** Исследование напряженного состояния образцов с напыленным слоем при изгибе 511
- Паничев Е.В., Смоленцев В.П.** Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия 517



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

- Табаков В.П., Кокорин В.Н., Морозов О.И., Алешин А.С., Аль Кадхими М.Ф.Д., Сагитов Д.И.** Моделирование процесса предварительной механической активации подложки композиции покрытие — металл и исследование напряженного и деформированного состояния рабочих поверхностей штампового инструмента 523

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15
2019
№ 11 (179)
November

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

Dr. of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistant

Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

Dr. of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr. of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr. of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.V. SLEPTSOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOICHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Butenko V.I., Shapovalov R.G.** Role of technological compatibility in create of effective coatings and layers on surfaces of machine parts 483
- Mikhal'chenkov A.M., Fes'kov S.A., Kozarez I.V., Loktev A.A.** Study of microhardness and microstructure of compensating elements and imported hoes during reinforcing recovery 489



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Zaides S.A., Pham Van Anh.** Effect of working tool kinematics during local loading on stressed state of surface layer 493
- Ovseenko A.N., Klauch D.N., Nosov D.P., Ponomarev A.A.** Determination of residual stresses in surface layer of thread vees 498
- Shchedrin A.V., Aleshin V.F., Bugaev A.M., Minyazeva L.Kh., Chikhacheva N.Yu.** Theoretical and experimental study and improvement of holes mandrelling methods by regular surface microgeometry tool under back-pressure conditions of process lubricants 501



THERMAL PROCESSING

- Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V.** Vacuum hardening of one- and two-carbide hard alloys 506



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

- Lebedev V.A., Loy S.A., Ermolaev G.V., Matvienko M.V.** Study of stressed state of sprayed layer samples during bending 511
- Panichev E.V., Smolentsev V.P.** Surface preparation for application of heat-resistant coating 517



PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Tabakov V.P., Kokorin V.N., Morozov O.I., Aleshin A.S., Al' Kadkhimi M.F.D., Sagitov D.I.** Modeling of preliminary mechanical activation process of coating—metal composition substrate and study of stressed and strained state of working surfaces of die tool 523

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015



УДК 669.056.9:629.118.6+621.81.01

В.И. Бутенко

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону),

Р.Г. Шаповалов

(Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: shapovalov116@mail.ru

Роль технологической совместимости в создании эффективных покрытий и слоев на поверхностях деталей машин

Рассмотрены вопросы влияния технологической совместимости на эффективность покрытий и слоев, создаваемых по разным технологиям на поверхностях деталей машин, и установлены факторы, от которых зависит технологическая совместимость материалов, сформировавших поверхностный слой. Исследовано влияние технологической совместимости материалов поверхностного слоя деталей на их эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: деталь, модифицирование, покрытие, слой, толщина, накопленная энергия, дислокационная насыщенность, распределение.

The questions of the effect of technological compatibility on the effectiveness of coatings and layers created by different technologies on the surfaces of machine parts are considered, and the factors on which the technological compatibility of the materials that formed the surface layer depends are established. The effect of technological compatibility of surface layer materials of parts on their service properties is studied.

Keywords: part, modification, coating, layer, thickness, storage power, dislocation saturation, distribution.

Введение

Проблема повышения надежности и работоспособности деталей машин всегда была одной из важнейших в машиностроении. Направления, связанные с повышением ресурса деталей за счет применения высокопрочных и износостойких материалов, в том числе высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов, себя исчерпали прежде всего по экономическим критериям и технологическим характеристикам [1]. В связи с этим в современном машиностроении перспективной становится разработка наукоемких технологий обработки деталей машин с использованием механических, физических, химических, электрических методов воздействия на материал поверхностного слоя в целях создания на них эффективных покрытий и слоев. Однако практическое использование достигнутых в этом направлении технических результатов часто сдер-

живается отсутствием критериев для применения тех или иных методов создания функциональных покрытий или модифицированных слоев на поверхностях деталей, учитывающих конкретные условия их эксплуатации и технологическую совместимость покрытий или слоев с основным материалом деталей. В связи с этим исследование роли технологической совместимости функциональных покрытий и модифицированных слоев на поверхностях деталей машин имеет научную и практическую значимость.

В работах [2, 3] показано, что качество покрытия или модифицированного слоя на поверхности детали во многом зависит от физико-механического состояния материала поверхностного слоя, которое, в свою очередь, определяется его энергетическим состоянием [4, 5]. В работах [6, 7] установлено, что для оценки энергетического состояния материала поверхностного слоя детали, подвергнутого механической обработке, может

быть использована удельная накопленная энергия деформации, определяемая дислокационной структурой материала и его напряженностью. От значения удельной накопленной энергии деформации зависят эксплуатационные характеристики поверхностного слоя детали, в первую очередь, износостойкость.

В процессе нанесения на поверхность детали функционального покрытия или создания на нем модифицированного слоя начальное значение удельной накопленной энергии деформации изменяется, причем это изменение зависит не только от процесса формирования покрытия или слоя на поверхности детали, но и от ее первоначального состояния: структуры, технологических остаточных напряжений, толщины слоя с измененными физико-механическими свойствами, распределения плотности дислокаций и других показателей (характеристик). Эти показатели состояния материала поверхностного слоя детали зависят от физико-механических характеристик обрабатываемого материала и способа обработки детали. В связи с этим **основная цель исследований** — выявление факторов, влияющих на эффективность модифицирования материала поверхностного слоя деталей, нанесения на них покрытий или создания многокомпонентных функциональных слоев, а также определение степени влияния начального энергетического состояния материала поверхностного слоя на эксплуатационные показатели создаваемых на них слоев или покрытий.

Методика проведения исследования

Под технологической совместимостью понимается способность покрытия, многокомпонентного функционального или модифицированного слоя, созданных на поверхностях деталей машин, воспроизводить, изменять или формировать новые эксплуатационные показатели основного материала поверхностного слоя.

Исследование роли технологической совместимости в создании эффективных покрытий и слоев на поверхностях деталей проводили на цилиндрических образцах диаметром 30 мм и длиной 320 мм из сталей 12ХН3А, 35ХГСА, сплава 45Х25Н20С2А и чугуна СЧ15, которые подвергали тонкому точению, шлифованию, обкатке роликом и алмазному выглаживанию. Режимы обработки были приняты согласно рекомендациям, приведенным в работе [1]. На поверхности исследуемых образцов электролитическим путем нанесли медный слой и никельфосфорное покрытие, а также многокомпонентные функциональные

слои следующих составов: состав 1 — полиэтилен ПЭНД + графит; состав 2 — полиэтилен ПЭНД + графит + сплав Вуда + кристаллический йод. Для нанесения многокомпонентных функциональных слоев на основе полиэтилена ПЭНД использовали установку, описанную в работах [1, 2].

Технологическую совместимость функциональных покрытий и модифицированных слоев с материалом поверхностного слоя детали оценивали показателем $P_{тс}$, определяемым по формуле: $P_{тс} = \Theta_{уд2}/\Theta_{уд1}$, где $\Theta_{уд1}$ и $\Theta_{уд2}$ — удельные величины накопленной энергии деформации материала поверхностного слоя детали соответственно до и после нанесения функционального покрытия или создания модифицированного слоя. Экспериментально удельную накопленную энергию деформации $\Theta_{уд}$ определяли при помощи специального устройства, в котором использовали метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Сущность этого метода состоит в дифференциальной двухстадийной схеме измерения разности тепловыделения в двух рабочих ячейках, содержащих исследуемый образец и эталон [7]. При этом порядок величины удельной накопленной энергии деформации $\Theta_{уд}$ считался соизмеримым с разностью тепловыделений исследуемого образца и эталона.

Для определения толщины поверхностного слоя h_c использовали устройство, описанное в работе [8], а показатель дислокационной насыщенности материала поверхностного слоя K_p [1] после обработки детали определяли рентгеновским методом, основанным на вычислении плотности дислокаций материала по уширению всплесков дифракционных линий от соответствующих кристаллографических плоскостей, полученных на рентгеновской установке ДРОН-3М. Металлографические исследования материала поверхностного слоя деталей проводили на интерференционном микроскопе МИИ-4М.

Эксплуатационные испытания деталей с модифицированным медью поверхностным слоем, никельфосфорным покрытием или созданным многокомпонентным функциональным слоем на основе полиэтилена ПЭНД выполняли на машине трения [8], с определением коэффициента трения. В качестве контртела использовали бруски из закаленной быстрорежущей стали Р6М5 с радиусной рабочей частью.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что в процессе предварительной обработки деталей в материале поверхностного

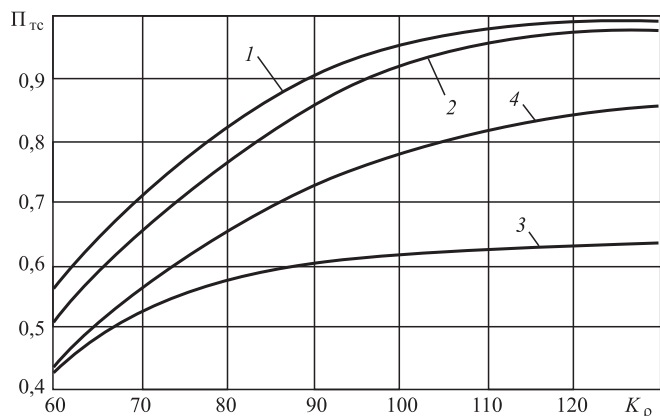


Рис. 1. Зависимость показателя $\Pi_{тс}$ от K_p для медного слоя (1), никельфосфорного покрытия (2), многокомпонентного функционального слоя составов 1 (3) и 2 (4). Образец из стали 12ХН3А

слоя происходит накапливание дислокаций, изменение плотности которых может быть оценено показателем дислокационной насыщенности K_p . Изменение плотности дислокаций материала поверхностного слоя детали приводит к изменению его энергетического состояния, а следовательно, должно оказывать влияние на технологическую совместимость материалов, из которых сформировался поверхностный слой.

На рис. 1 приведены зависимости показателя технологической совместимости $\Pi_{тс}$ от коэффициента дислокационной насыщенности материала поверхностного слоя детали K_p для медного слоя, никельфосфорного покрытия и многокомпонентных функциональных слоев на основе

полиэтилена ПЭНД, анализ которых свидетельствует о том, что способы изменения состава материала поверхностного слоя путем его модифицирования, нанесения покрытия или создания многокомпонентного функционального слоя по-разному влияют на окончательное значение показателя $\Pi_{тс}$. При этом нанесение медного слоя или никельфосфорного покрытия на поверхность детали с увеличением K_p обеспечивает более высокие значения $\Pi_{тс}$ по сравнению с многокомпонентными функциональными слоями на полиэтиленовой основе, что может быть объяснено большим сродством меди и никеля к железу и возникновением между ними электронно-дислокационного взаимодействия [3, 5].

Металлографические исследования поверхностей деталей показали, что от значения начального показателя дислокационной насыщенности K_p зависит не только $\Pi_{тс}$ (см. рис. 1), но и состояние материала поверхностного слоя (рис. 2), которое во многом определяет эксплуатационные свойства деталей трибосистем при их контактном взаимодействии [1, 2, 8].

Исследовали зависимость $\Pi_{тс}$ от толщины покрытия, а также модифицированного или наносимого многокомпонентного функционального слоя h_c для разных материалов поверхностного слоя (рис. 3). С одной стороны, выполненные исследования показали, что с увеличением толщины модифицированного слоя, покрытия или многокомпонентного функционального слоя показатель $\Pi_{тс}$ уменьшается независимо от основного материала детали. С другой стороны, полученные данные свидетельствуют о достаточно

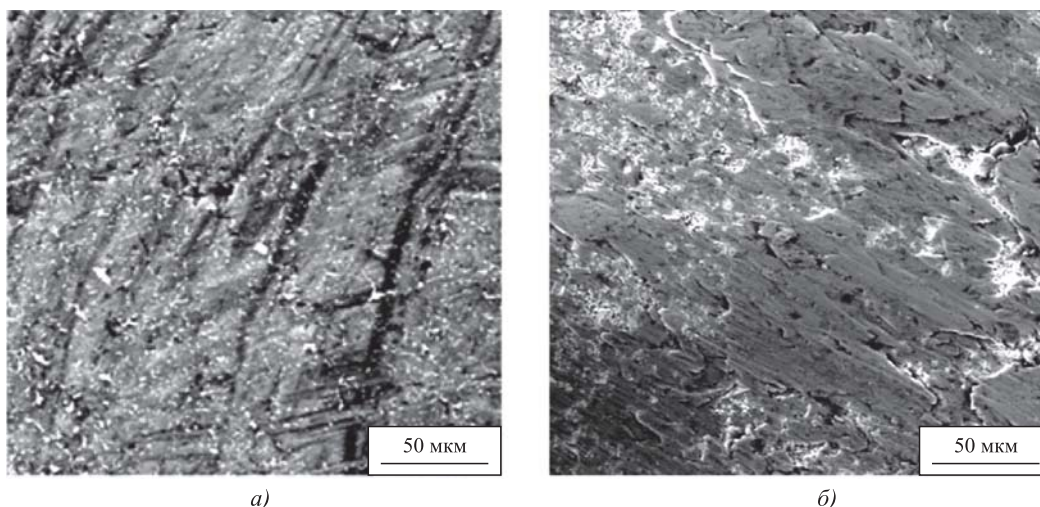


Рис. 2. Состояние модифицированного медью поверхностного слоя детали в зависимости от начального значения показателя K_p :

a — обкатка роликом, $K_p = 110$, $\Pi_{тс} = 0,96$; *б* — шлифование, $K_p = 90$, $\Pi_{тс} = 0,89$; сталь 12ХН3А ($\times 75$)

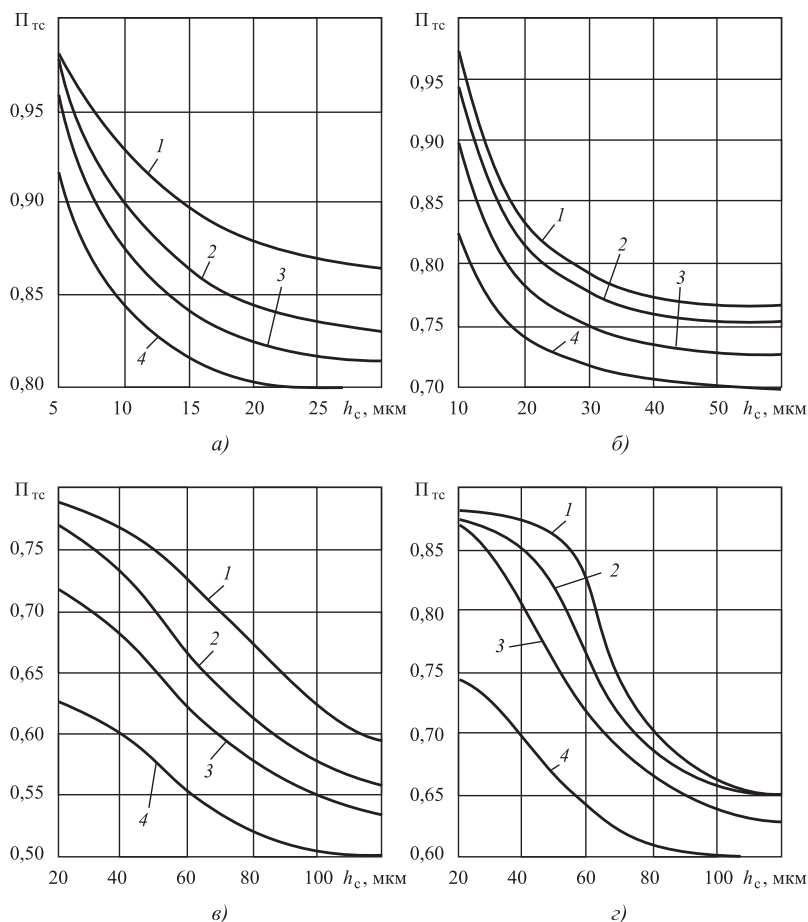


Рис. 3. Изменение показателя $P_{тс}$ в зависимости от толщины h_c медного слоя (а), никельфосфорного покрытия (б), многокомпонентного функционального слоя составов 1 (в) и 2 (г) для деталей из стали 12ХНЗА (1), стали 35ХГСА (2), сплава 45Х25Н20С2Ф (3) и чугуна СЧ15 (4). Предварительная обработка поверхностей — шлифование

тесной зависимости $P_{тс}$ от состояния исходного материала поверхностного слоя детали. В связи с этим были выполнены исследования по определению значения $P_{тс}$ в зависимости от материала детали, способа финишной обработки ее поверхности и вида используемого модифицированного или многокомпонентного слоя (таблица).

В случае создания на поверхностях деталей твердосплавных функциональных покрытий типа TiN, NiC с использованием высокотемпературного потока энергии [2, 3] $\mathcal{E}_{уд2} \geq \mathcal{E}_{уд1}$ вследствие высокого начального значения $\mathcal{E}_{уд2}$ и значения показателя $P_{тс} = \mathcal{E}_{уд2}/\mathcal{E}_{уд1} \geq 1$. Однако в этом случае происходит перераспределение внутренних энергий между материалом поверхностного слоя детали и нанесенного покрытия, которое во многом зависит от времени выдержки, вследствие чего значение показателя $P_{тс}$ изменяется от некоторого $P_{тс \min}$ до $P_{тс \max}$, что подтверждено данными, приведенными на рис. 4. При этом изменения показателя $P_{тс}$ зависят от химического состава стали или сплава и, прежде всего, процентного содержания углерода. Анализ представленных гистограмм свидетельствует о том, что пока-

Таблица 1

Значения $P_{тс}$ в зависимости от материала детали, способа финишной обработки ее поверхности и вида используемого модифицированного или многокомпонентного слоя

Материал детали	Способ обработки	Вид модифицированного или многокомпонентного слоя	$P_{тс}$
Сталь 12ХНЗА	Тонкое точение	Медный	0,98
		Никель-фосфорный	0,94
		Состав 2	0,82
	Шлифование	Медный	0,96
		Никель-фосфорный	0,89
		Состав 2	0,78
	Обкатка роликом	Медный	0,97
		Никель-фосфорный	0,95
		Состав 2	0,90
	Алмазное выглаживание	Медный	0,98
		Никель-фосфорный	0,95
		Состав 2	0,92
Сталь 35ХГСА	Тонкое точение	Медный	0,98
		Никель-фосфорный	0,95
		Состав 2	0,83
	Шлифование	Медный	0,97
		Никель-фосфорный	0,88
		Состав 2	0,80
	Обкатка роликом	Медный	0,98
		Никель-фосфорный	0,96
		Состав 2	0,91
	Алмазное выглаживание	Медный	0,98
		Никель-фосфорный	0,96
		Состав 2	0,87
Сплав 45Х25Н20С2А	Тонкое точение	Медный	0,94
		Никель-фосфорный	0,91
		Состав 2	0,79
	Шлифование	Медный	0,93
		Никель-фосфорный	0,82
		Состав 2	0,75
	Обкатка роликом	Медный	0,96
		Никель-фосфорный	0,91
		Состав 2	0,83
	Алмазное выглаживание	Медный	0,96
		Никель-фосфорный	0,88
		Состав 2	0,80

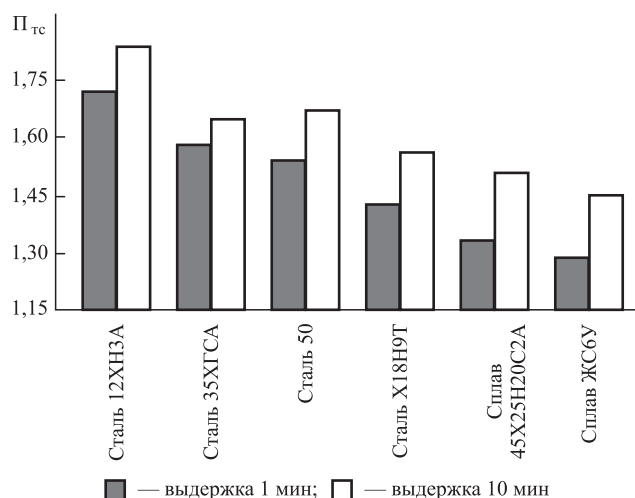


Рис. 4. Гистограммы изменения показателя $P_{тс}$ деталей с TiN в зависимости от материала детали и времени выдержки после нанесения покрытия с использованием высокотемпературного потока энергии

затель $P_{тс}$ зависит от теплопроводности основного материала детали и его способности к накоплению поверхностной энергии: у сплавов 45X25H20C2A и ЖС6У это повышение менее значительно, чем у сталей 12ХН3А, 35ХГСА, 50 и Х18Н9Т. В связи с этим можно предположить, что увеличение показателя $P_{тс}$ в случае создания на поверхностях деталей твердосплавных функциональных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии происходит за счет перехода части теплоты из поверхностного слоя основного материала детали в покрытие, в результате чего увеличивается его удельная накопленная энергия $\mathcal{E}_{уд}$.

Экспериментальными исследованиями установлено, что минимальные значения коэффициента трения при контактном взаимодействии деталей, на поверхностях которых созданы модифицированные слои, покрытия или многокомпонентные функциональные слои, достигаются при равенстве их показателей $P_{тс}$. Используя метод многофакторного планирования эксперимента типа 2^3 , были получены следующие эмпирические зависимости для практического определения показателя $P_{тс}$ при различных исходных состояниях поверхностного слоя деталей из железоуглеродистых сплавов, которые могут быть использованы для реализации условия, при котором независимо от основных материалов контактируемых деталей их показатели $P_{тс}$ одинаковы, т.е. $P_{тс1} = P_{тс2}$, или $P_{тс1}/P_{тс2} = 1$:

при модифицировании материала поверхностного слоя медью

$$P_{тс} = 0,729\sigma_T^{-0,135} \Delta K_p^{0,207} h_c^{0,576-0,51 \log h_c} K_{птс}; \quad (1)$$

при нанесении на поверхность детали никель-фосфорного покрытия

$$P_{тс} = 0,684\sigma_T^{-0,122} \Delta K_p^{0,195} h_c^{0,891-0,6 \log h_c} K_{птс}; \quad (2)$$

при создании на поверхности детали многокомпонентного функционального слоя, содержащего полиэтилен ПЭНД, графит, сплав Вуда, кристаллический йод

$$P_{тс} = 0,457\sigma_T^{-0,118} \Delta K_p^{0,139} h_c^{1,816-0,8 \log h_c} K_{птс}; \quad (3)$$

где $\Delta K_p = (K_p)_н - (K_p)_к$;
 $(K_p)_н, (K_p)_к$ — значения показателя дислокационной насыщенности материала поверхностного слоя детали до и после его модифицирования, нанесения никельфосфорного покрытия или создания многокомпонентного функционального слоя;
 $K_{птс}$ — коэффициент, зависящий от знака технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя детали перед его модифицированием, нанесением никельфосфорного покрытия или созданием функционального слоя, при положительных напряжениях $K_{птс} = 1,0$, при отрицательных — $K_{птс} = 1,1$.

Зависимости (1)–(3) справедливы при изменении входящих в них параметров в следующих диапазонах: $\sigma_T = 200...450$ МПа; $\Delta K_p = 20...60$; при модифицировании материала поверхностного слоя медью $h_c = 5...20$ мкм; при нанесении на поверхность детали никельфосфорного покрытия $h_c = 20...80$ мкм; при создании функционального слоя вышеуказанного состава $h_c = 50...200$ мкм.

Большую практическую значимость имеет распределение $P_{тс}$ в зависимости от толщины создаваемого на поверхности детали модифицированного слоя, покрытия или многокомпонентного функционального слоя, так как от характера распределения $P_{тс}$ зависит идентичность обрабатываемых деталей по надежности. На рис. 5 приведены кривые распределения $P_{тс}$ в зависимости от толщины слоев, нанесенных на поверхности деталей из стали 12ХН3А, из анализа которых следует, что для всех исследуемых слоев и покрытий увеличение их толщины приводит к росту поля рассеяния показателя $P_{тс}$, причем у многокомпонентного функционального слоя на основе полиэтилена ПЭНД это повышение существенно больше, чем у модифицированного медью слоя или никельфосфорного покрытия, что, по-видимому, объясняется химическим составом и строением полиэтилена ПЭНД, который относится к аморфным веществам. Вследствие этого влияние энергетического состояния основного материала поверхностного слоя, полученного

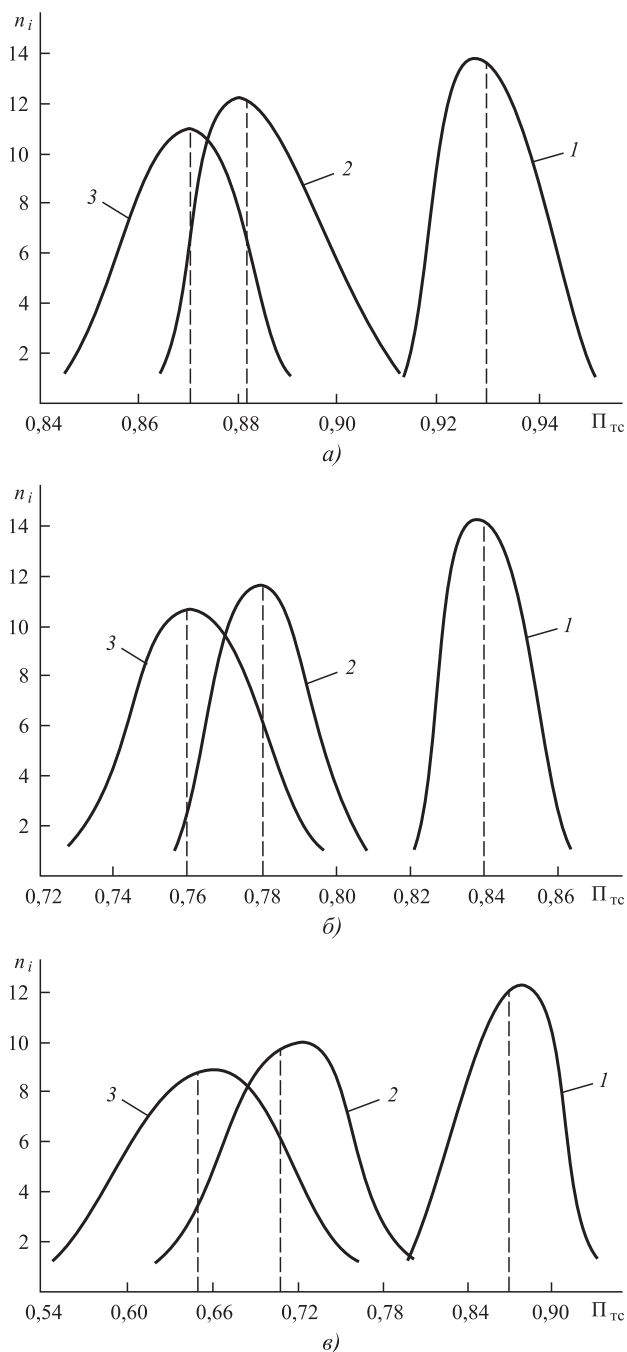


Рис. 5. Кривые распределения показателя $\Pi_{тс}$ в зависимости от толщины слоя или покрытия h_c :

a — медный слой: 1 — $h_c = 10$ мкм; 2 — $h_c = 20$ мкм; 3 — $h_c = 40$ мкм; *б* — никельфосфорное покрытие: 1 — $h_c = 20$ мкм; 2 — $h_c = 50$ мкм; 3 — $h_c = 80$ мкм; *в* — многокомпонентный функциональный слой состава 2: 1 — $h_c = 60$ мкм; 2 — $h_c = 120$ мкм; 3 — $h_c = 200$ мкм. Предварительная обработка поверхностей — обкатка роликом

после финишной обработки детали, с увеличением толщины слоя существенно снижается, а многокомпонентный функциональный слой на

основе полиэтилена приобретает новое энергетическое состояние и эксплуатационные свойства.

Наименьшее поле рассеяния для исследуемых функциональных слоев и покрытий наблюдается при толщине слоя h_c , близкой к проявлению эффекта "нанотрибологической ямы", согласно которому в контактной зоне обеспечивается минимально возможный для сопряжения и условий контактирования коэффициент трения [1, 2, 8]. Эксплуатационные испытания деталей с исследуемыми функциональными слоями и покрытием показали, что наименьший коэффициент трения, обусловленный проявлением эффекта "нанотрибологической ямы", наблюдается при толщине модифицированного медью поверхностного слоя, равной 10 мкм ($\Pi_{тс} = 0,92...0,94$), толщине никельфосфорного покрытия — 20 мкм ($\Pi_{тс} = 0,82...0,86$) и толщине многокомпонентного функционального слоя состава 2 — 60 мкм ($\Pi_{тс} = 0,84...0,91$).

Полученные данные свидетельствуют о том, что при разработке металлургических, конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий по повышению работоспособности деталей трибосистем следует стремиться к формированию на их поверхностях наноструктурных слоев толщиной, обеспечивающей максимальную величину $\Pi_{тс}$ независимо от их состава и технологии создания.

Заключение

Исследования показали, что при модифицировании материала поверхностного слоя детали, нанесении на него функционального покрытия или создания многокомпонентного слоя необходимо учитывать технологическую совместимость материалов, которая зависит не только от видов используемых материалов и технологий их нанесения на поверхность детали, но и их толщины, способа предварительной обработки поверхности детали, условий эксплуатации и других факторов. Полученные результаты исследований могут быть использованы при создании на поверхностях ответственных деталей машин эффективных слоев и покрытий, обеспечивающих высокую работоспособность их в течение всего периода эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. Наукоемкие технологии создания высокоресурсных деталей машин. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. 404 с.
2. Бутенко В.И. Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях

деталей машин. Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2016. 235 с.

3. **Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П.** Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2009. 176 с.

4. **Лебедев В.А.** Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2006. 183 с.

5. **Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М.** Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 8 (64). С. 339—343.

6. **Прокофьев М.А.** Энергетический критерий оптимизации режимов обработки деталей шлифованием // Машиностроение — основа технологического развития России ТМ-2013: сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та, 2013. С. 334—336.

7. **Тимофеев М.В., Прокофьев М.А.** Методика и аппаратура измерения накопленной энергии деформации в поверхностном слое деталей машин // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Ч. II. Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. С. 25—29.

8. **Бутенко В.И.** Структура и потенциал трибоконтakta поликристаллических материалов. Ростов-на-Дону, 2018. 160 с.

УДК 620.178.152

А.М. Михальченков, С.А. Феськов, И.В. Козарез
(Брянский государственный аграрный университет),
А.А. Локтев
(Российский университет транспорта, г. Москва)
E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

Исследование микротвердости и микроструктуры компенсирующих элементов и импортных культиваторных лап при их упрочняющем восстановлении

Выявлено, что материалы культиваторной лапы и компенсирующего элемента подвергаются термоупрочнению на микротвердость 500 и 480 HV соответственно. Сталь культиваторной лапы имеет структуру бейнита, а сталь компенсирующего элемента — сорбита отпуска. Использование выбракованных листов рессор в качестве ремонтных материалов обеспечит высокое сопротивление абразивному изнашиванию при проведении культивации.

Ключевые слова: микротвердость, микроструктура, компенсирующие элементы, культиваторные лапы, упрочняющее восстановление, термоупрочнение, бейнит, сорбит.

It is found that the materials of the hoe and the compensating element are subjected to heat hardening to microhardness of 500 and 480 HV, respectively. Steel for hoe has bainite structure and steel for compensating element — secondary sorbite structure. The use of rejected leaf springs as repair materials provides high abrasive wear during cultivation.

Keywords: microhardness, microstructure, compensating elements, hoes, reinforcing recovery, thermal hardening, bainite, sorbite.

Введение. Постановка задачи

Возобновление ресурса предельно изношенных деталей почвообрабатывающих орудий импортного производства с одновременным упрочнением в настоящее время приобретает особую значимость для производителей сельскохозяйственной продукции, в связи с их сравнительно невысоким ресурсом (хотя и большим, чем у деталей отечественных производителей), значительной рыноч-

ной стоимостью, огромными масштабами производства и нередко дефицитностью [1]. Создание технологий устранения дефектов деталей требует знаний не только специфики и геометрии износа, но и материаловедческих вопросов [2, 3]. Так, при разработке способа восстановления предельно изношенных импортных лап (рис. 1, а) посевных комплексов методом приваривания компенсирующих элементов вместо истертой области [4, 5] (рис. 1, б) необходимо иметь сведения о микро-



Рис. 1. Стрельчатая культиваторная лапа:
a — предельно изношенная; *б* — восстановленная методом компенсирующих элементов

структуре и микротвердости (HV) детали и ремонтной вставки, так как они определяют износостойкость и ресурс отреставрированного изделия. Зарубежные производители рабочих органов почвообрабатывающих орудий не раскрывают параметров режима технологий изготовления, что в свою очередь заставляет отечественных исследователей специально заниматься вышеозначенными вопросами.

Цель работы — проведение исследований микротвердости и выявление микроструктур металла компенсирующей вставки и ремонтируемой лапы для определения ее способности к сопротивлению абразивному износу.

Материалы и оборудование для исследований

В качестве материалов при исследовании использовали выбракованные культиваторные лапы посевного комплекса "Моррис" (Канада) и листы рессор автомобилей УАЗ, утратившие свои служебные свойства, но сохранившие значительную твердость, выполняющие роль компенсирующих элементов, изготовленные из стали 65Г.

Контроль твердости HV осуществляли на приборе ПМТ-3М при нагрузке на индентор (F) 1 Н, времени выдержки $t = 15$ с, увеличение 370. Нагрузку F выбирали исходя из соображений минимизации разбросов опытных данных, для чего использовали результаты исследований, приведенные в работе [6].

Микрошлифы при контроле микротвердости и микроанализе подготавливали по общепринятой методике. Все операции осуществляли с минимальным температурным воздействием, последствия которых могли сказаться на структуре исследуемого материала. Для удобства подготовки темплетов и проведения исследований образцы

заливали в формы эпоксидным составом: смола ЭД18 — 100 мас. ч., полиэтиленполиамин (отвердитель) — 10 мас. ч., что позволило заменить дорогостоящий сплав Вуда.

Твердость измеряли на нетравленных микрошлифах, т.е. определяли агрегатную микротвердость. Видимое в микроскопе поле представляет собой гомогенную субстанцию с наличием незначительного количества включений.

Применительно к материалу лапы отпечатки наносили в направлении от рабочей поверхности к тыльной стороне по толщине (рис. 2). Оценку микротвердости материала компенсирующего элемента выполняли по 46 отпечаткам, наносимым на поверхность образца.

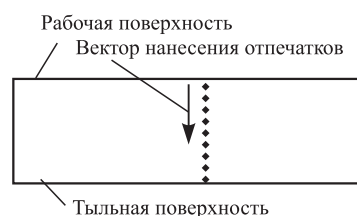


Рис. 2. Схема измерения микротвердости материала лапы

Исследование структур термоупрочненной стали 65Г проводили после травления образцов (4%-ным спиртовым раствором пикриновой кислоты) с помощью металлографического микроскопа "МЕТАМ ЛВ-34", фотографирование структурных составляющих — цифровой камерой Canon через специальную насадку.

Результаты исследований и их анализ

Среднее значение микротвердости составило 500 HV, что соответствует твердости 51 HRC, т.е. материал лапы подвергается термоупрочняющей обработке. Следует обратить внимание на значительную разность между минимальным и максимальным значением микротвердости (табл. 1). Появление таких значений в общей выборке обусловлено попаданием отпечатков во включения, не характерные для данного материала.

Таблица 1

Статистические показатели результатов измерения микротвердости материала лапы

Показатель	Значение
HV_{\min}	391
HV_{\max}	605
$HV_{\text{ср}}$	500
Коэффициент вариации	0,11

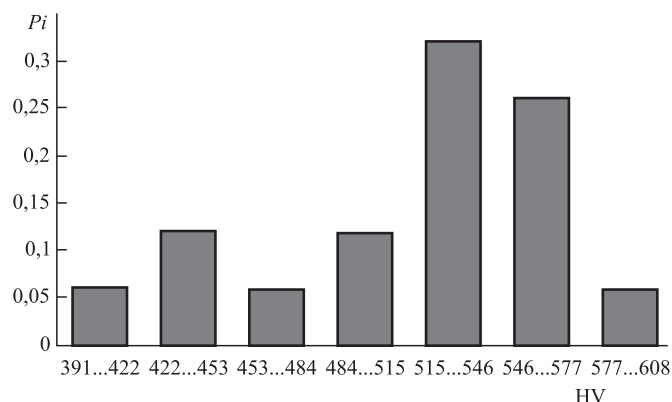


Рис. 3. Гистограмма распределения микротвердости материала культиваторной лапы

В то же время невысокие значения вероятности ($P_i \leq 0,05$) таких попаданий указывают на однородность материала (рис. 3). При этом коэффициент вариации, оценивающий рассеяние опытных данных, составляет 0,11, что указывает на их незначительный разброс, подтверждая качественное проведение термообработки.

Исходя из значения коэффициента вариации $0,11 < 0,33$, можно сделать заключение о нормальном законе распределения микротвердости материала изучаемой культиваторной лапы. В то же время имеет место увеличение вероятности появления значений в диапазоне 515...577 HV, указывающее на смещение микротвердости в большую сторону.

Таким образом, среднее значение микротвердости материала лапы составляет 500 HV (51 HRC), что соответствует термоупрочнению закалкой и средним отпускком сталей рессорно-пружинного класса. Кроме того, было выявлено, что имеет место термообработка на всю глубину рабочей области лапы. Такое значение твердости обеспечит достаточно высокую стойкость к абразивному изнашиванию при проведении культивации.

Вероятностно-статистическая обработка полученных результатов металла компенсирующих элементов позволила установить, что среднее значение микротвердости составляет 480 HV (табл. 2)

Таблица 2

Статистические показатели результатов измерения микротвердости компенсирующего элемента

Показатель	Значение
HV_{min}	460
HV_{max}	500
HV_{cp}	480
Коэффициент вариации	0,06

и соответствует твердости 44...45 HRC. Такие значения твердости можно считать достаточными для использования листов рессор, снятых с эксплуатации в качестве компенсирующих элементов, обеспечивающих значительную стойкость к абразивному изнашиванию.

Листы рессор, из которых изготовили ремонтные вставки (сталь 65Г) в состоянии поставки имеют твердость до 50 HRC. Снижение твердости до 45 HRC связано с релаксацией остаточных напряжений в процессе эксплуатации, приводящей к некоторым структурным изменениям [7].

Разность минимальных и максимальных значений микротвердости не превышает 40 HV, тогда как у материала лапы такой показатель достигает значения более 200 HV. Это указывает на более стабильные механические свойства материала ремонтной вставки в сравнении со сталью, из которой изготавливают лапу. Подтверждением служит низкий коэффициент вариации, равный 0,06.

Гистограмма имеет "классический" вид (рис. 4), характерный для нормального распределения без каких-либо существенных отклонений экспериментальных данных в большую или меньшую сторону.

Таким образом, установлено, что среднее значение агрегатной микротвердости материала ремонтной вставки составляет около 480 HV или 44...45 HRC, соответствующее термоупрочнению закалкой и средним отпускком сталей рессорно-пружинного класса. Наличие такой твердости позволяет использовать листы рессор, утративших нормированную жесткость, в качестве абразивно-стойкого материала при восстановлении стрельчатых лап культиваторов. Механические свойства применяемой стали отличаются высокой стабильностью показателей (больше, чем у стали лапы) и подчиняются нормальному закону распределения.

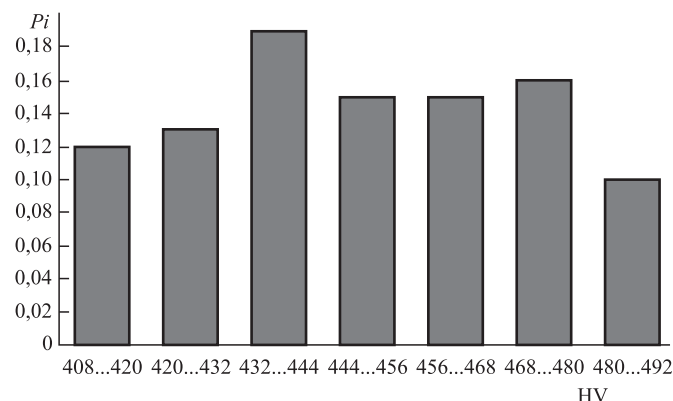


Рис. 4. Гистограмма распределения микротвердости компенсирующего элемента

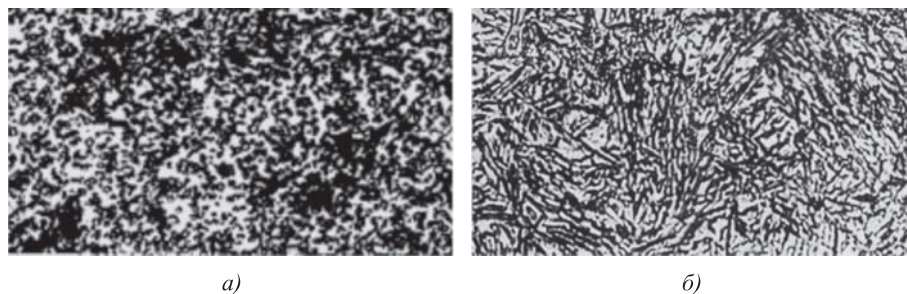


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 500$):

а — привариваемого материала (ремонтная вставка); *б* — металла лапы

Микроструктурный анализ позволил установить, что структура материала ремонтной вставки представляет собой сорбит отпуска (рис. 5, *а*). Это подтверждается полученным ранее значением микротвердости, составляющим 43...45 HRC, т.е. структура соответствует нормативам на термообработку рессорно-пружинных сталей — закалка в масле и последующий среднетемпературный отпуск, хотя отмечается несколько меньший диапазон значений твердости. Такое явление объясняется некоторым снижением механических свойств вследствие достаточно длительной эксплуатации стали в условиях знакопеременных нагрузений.

Структура металла лапы представляет собой бейнит (рис. 5, *б*) с твердостью 50...52 HRC. Предположительно такая структура получена в результате закалки в масле и среднетемпературного отпуска с максимально низкой температуры (примерно 300 °С) и соответствует структуре рессорно-пружинных сталей с наличием хрома [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инновационные** направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники / С.А. Соловьев, В.П. Лялякин, С.А. Горячев и др. М.: Информагротех, 2014. 160 с.

2. **Разработка** и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов / Я.П. Лобачевский, И.В. Лискин, С.А. Сидоров и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 4. С. 3—8.

3. **Булычев В.В., Голубина С.А., Зуев Е.С.** Разработка технологии и оборудования для упрочнения отвалов плугов полуавтоматической вибродуговой наплавкой // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2017. № СВ2 (13). С. 35—40.

4. **Михальченко А.М., Феськов С.А.** Изнашивание стрелчатых лап посевного комплекса Moggis, восстановленным способом термоупрочненных "компенсирующих элементов" // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 12. С. 50—52.

5. **Феськов С.А.** Надежность стрелчатых культиваторных лап (технологии и их возможности) // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 46—52.

6. **Михальченко А.М., Курчаткин В.В., Тюрева А.А.** Повышение качества испытаний на микротвердость восстановленных деталей из серого чугуна // Методы менеджмента качества. 2000. № 12. С. 31—35.

7. **Цхондия Г.А.** Моделирование релаксации напряжений в условиях термического всплеска, индуцированного импульсом тока // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 5. С. 30.

8. **Новиков А.А., Тюрева А.А., Михальченкова М.А., Гринь А.М.** Термоупрочнение изготовленных из вторичного сырья долот штамповарных лемехов // Сельский механизатор. 2016. № 10. С. 28—29.



Влияние кинематики рабочего инструмента при локальном нагружении на напряженное состояние поверхностного слоя

Исследовано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя в зависимости от кинематики движения рабочего инструмента. Результаты расчета показали, что имеются новые возможности как для изменения напряженного состояния в очаге упругопластической деформации, так и остаточных напряжений в упрочненных деталях. Новая кинематика движения рабочего инструмента позволяет изменить напряженное состояние в очаге деформации и повысить степень упрочнения. Наличие продольного перемещения рабочего инструмента приводит к росту интенсивности напряжений в очаге упругопластической деформации и небольшому снижению глубины упрочненного слоя.

Ключевые слова: кинематика, перемещение, напряженное состояние, остаточные напряжения, упругопластическая деформация, упрочнение.

The strain-stress state of the surface layer depending on the kinematics of the working tool movement is studied. The results of the calculations showed that there are new opportunities for changing the stressed state in the elastoplastic deformation zone and residual stresses in the hardened parts. New kinematics of the working tool movement allows to change the stressed state in the deformation zone and increase the hardening degree. The presence of longitudinal displacement of the working tool leads to increase the stresses intensity in the elastoplastic deformation zone.

Keywords: kinematics, moving, stressed state, residual stresses, elastoplastic deformation, hardening.

Введение

Деформационное упрочнение — один из эффективных способов отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих повышение качества поверхностного слоя деталей машин [1–3]. Методы поверхностного пластического деформирования по способу воздействия на поверхностный слой металла подразделяют на локальное вдавливание, деформирование скольжением и деформирование качением [4].

Локальное вдавливание применяют для местного упрочнения поверхностного слоя деталей. Обработка качением деформирующего инструмента основана на обкатывании шариком или роликом поверхности детали. Процесс скольжения напоминает процесс резания, только в данном случае

стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя.

При отделочно-упрочняющей обработке деталей малой жесткости радиальное нагружение имеет особенности, так как от величины радиальных сил зависит не только качество поверхностного слоя, но и геометрическая точность формы самой детали — большая радиальная нагрузка вызывает искривление детали, а малая — не обеспечивает снижения шероховатости и достижения необходимой степени упрочнения [5].

Для повышения интенсивности напряженного состояния обычно уменьшают радиус при вершине индентора, площадь контакта при этом уменьшается, а напряженное состояние увеличивается. Однако в этом случае снижается производительность процесса обработки и износостойкость рабочего

инструмента. Поэтому поиск способа повышения интенсивности напряжений в очаге деформации — актуальная задача, которая позволит решить ряд проблем при обработке деталей малой жесткости.

Важнейший параметр качества поверхностного слоя — остаточные напряжения сжатия, которые обычно формируются при поверхностно-пластическом деформировании (ППД) [6]. В работах [7–9] установлено, что остаточные напряжения сжатия оказывают существенное влияние на повышение сопротивления усталости, износостойкости и коррозионной стойкости металлов и сплавов. Например, при обработке металлов давлением остаточные напряжения иногда достигают такой величины, что могут привести к разрушению металлических изделий [10].

Цель работы — изучение напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в зависимости от кинематики рабочего инструмента.

Кинематика деформирующего инструмента при локальном нагружении

Рассмотрим процесс поверхностного пластического деформирования локальным индентором. На рис. 1 представлено три схемы нагружения шарового индентора.

Локальное вдавливание (рис. 1, а) представляет собой вдавливание шаровой поверхности нагруженной силой, действующей перпендикулярно к поверхности контакта и проходящей через вертикальную ось индентора. На рис. 1, б деформирующему индентору сообщается дополнительно вращательное движение относительно вертикальной оси, в направлении которой действует сила нагружения F . Более сложная кинематика индентора

показана на рис. 1, в. Ось индентора, совпадающая с направлением действия силы нагружения, совершает пространственное движение, образуя конусную поверхность с углом 2α при вершине.

Конечно-элементное моделирование процесса локального нагружения

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными способами ППД и исследования формирования временных и остаточных напряжений в очаге деформации применяют компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов. Одной из универсальных и широко используемых программ, реализующих этот метод, является программа ANSYS, которая была использована в данной работе [12].

В соответствии с принятой постановкой задачи моделирования процесса упрочняющей обработки ППД создана конечно-элементная модель, состоящая из обрабатываемой заготовки и полушара. Размеры заготовки $20 \times 20 \times 20$ мм, материал — сталь 45; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и модулем упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа. Материал заготовки упругопластический, изотропный, упрочняющийся. Полушар принято как абсолютно жесткое тело, тепловые явления не учитывали, коэффициент трения в зоне контакта без вращения принят $\eta = 0,2$, а с вращением — $\eta = 0,1$; частота вращения индентора $n_{\text{инстр}} = 500 \text{ мин}^{-1}$; угол наклона индентора $\alpha = 8^\circ$.

Для получения численного решения необходимо было выполнить разбиение геометрических моделей конечно-элементной сеткой. Принята пространственная сетка — тетраэдрическая форма для образца и гексаэдрическая форма для индентора. Конечно-элементная модель содержит 27 421 элемент и 5176 узлов.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках по глубине модели определяли интенсивность напряжений (von-Mises) и остаточные напряжения по осям OX , OY , OZ . При использовании главных напряжений σ_x , σ_y и σ_z интенсивность напряжений по Мизесу σ_i вычисляется как [13]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times$$

$$\times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}. \quad (1)$$

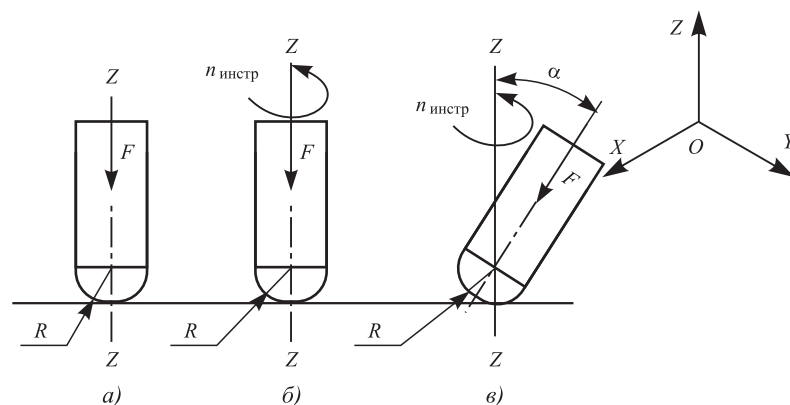


Рис. 1. Кинематические схемы рабочего инструмента при локальном нагружении [11]:

а — индентор без вращения; б — индентор с вращением относительно оси $Z-Z$; в — наклонный индентор с вращением относительно оси $Z-Z$ под углом α

Результаты компьютерного моделирования

Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно подразделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе — при их отсутствии. Временные напряжения влияют на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость деформирующего инструмента, а остаточное напряжение влияет на сопротивление усталости, процесс разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства деталей машин [14–16].

Рассмотрим напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в пластическом деформированном слое при разных схемах нагружения. На рис. 2 (см. обложку) представлены графики изменения интенсивности напряжений с течением времени при нагружении индентора по схемам, приведенным на рис. 1.

Все три схемы нагружения имеют четыре выраженных участка. Первый участок (в интервале 1...2 с) характеризуется упругопластическим поведением материала (см. рис. 2, *a*). Второй участок (в интервале 2...5 с) представляет пластическую деформацию. Следующий участок — участок разгрузки, когда индентор поднимается вверх, и последний участок справа характеризует остаточную напряженность материала.

При вращении индентора относительно вертикальной оси характер кривых сохраняется, но деформация происходит в условиях пульсации, которую можно объяснить сдвигами кристаллической структуры металла. Усложнение кинематики рабочего инструмента приводит к повышению интенсивности напряжений в очаге деформации. В рассматриваемых схемах нагружения интенсивность напряжений возросла почти в 2 раза (от 890,7 до 1561,8 МПа). При движении рабочего инструмента в направлении подачи происходит дополнительный сдвиг материала и увеличение напряженного состояния.

При наличии продольного перемещения ($v = 0,05$ мм/с), т.е. перемещения индентора по направлению оси OY , интенсивность временных напряжений в очаге деформации повышается на 15...20 %, а интенсивность остаточных напряжений — на 20...30 %.

Кривая изменения интенсивности напряжений при наличии продольного перемещения имеет более сложный характер, который объясняется тем, что при нагружении индентора с продоль-

ным перемещением за счет дополнительных сил трения скольжения происходят более сложные деформационные процессы в поверхностных слоях, что приводит к росту напряженного состояния в очаге упругопластической деформации.

На рис. 3 показано распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения рабочего инструмента.

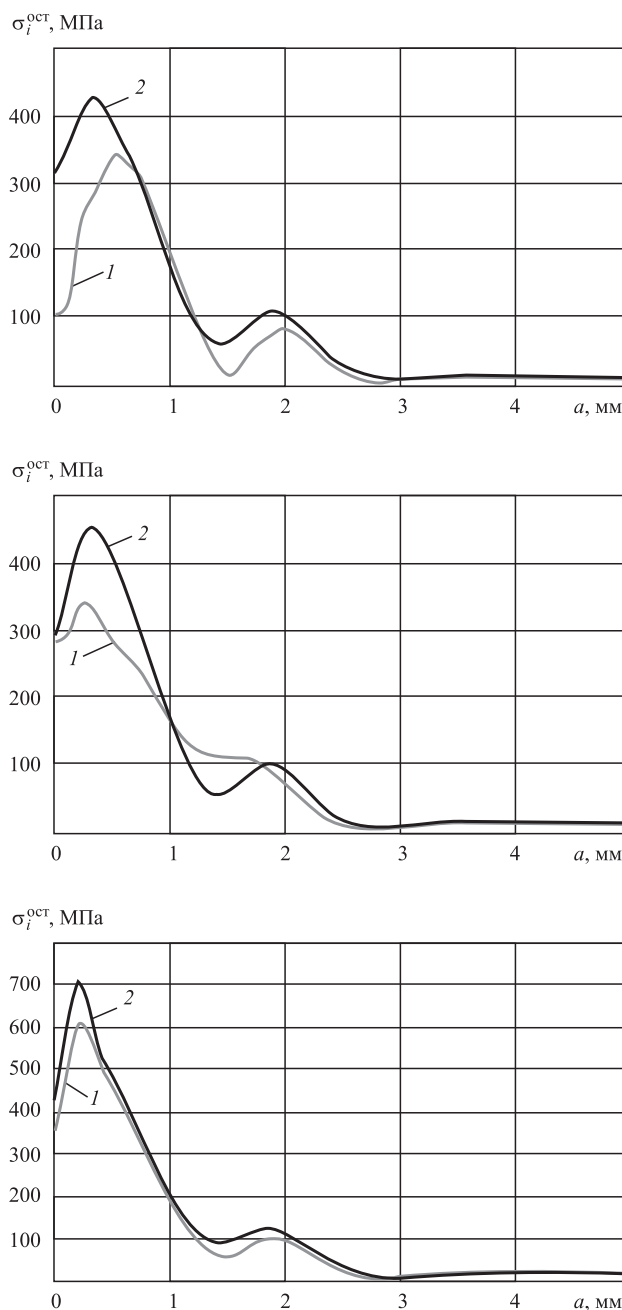


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя a при трех выбранных схемах нагружения (см. рис. 1):

1 — внедрение индентора без перемещения; *2* — внедрение индентора с продольным перемещением

Результаты расчета максимальных временных и остаточных напряжений, МПа, при нагружении деформирующего инструмента

Схема нагружения		σ_i^{BP}	σ_x^{BP}	σ_y^{BP}	σ_z^{BP}	$\sigma_i^{ост}$	$\sigma_x^{ост}$	$\sigma_y^{ост}$	$\sigma_z^{ост}$
Рис. 1, а	$t = 0,1$ мм ($v = 0$)	891	-1272	-1272	-2185	358	-477	-477	-215
	$t = 0,1$ мм ($v \neq 0$)	1055	-1455	-1559	-2240	461	-528	-589	-248
Рис. 1, б	$t = 0,1$ мм ($v = 0$)	988	-1302	-1302	-2102	363	-471	-471	-229
	$t = 0,1$ мм ($v \neq 0$)	1098	-1491	-1674	-2478	483	-550	-635	-291
Рис. 1, в	$t = 0,1$ мм ($v = 0$)	1562	-2259	-2259	-3140	604	-649	-649	-342
	$t = 0,1$ мм ($v \neq 0$)	1632	-2372	-2383	-3355	703	-782	-867	-388

Независимо от вида нагружения рабочего инструмента остаточные напряжения распределяются на глубине около 3 мм (рис. 3). Максимальные напряжения возникают на глубине поверхностного слоя 0,3...0,5 мм. При наличии продольного перемещения рабочего инструмента остаточные напряжения сжатия повышаются на 20...30 %.

Чем сложнее кинематика движения деформирующего инструмента, тем большего значения достигают остаточные напряжения сжатия. Данные для сравнения и анализа результатов расчета напряженного состояния в очаге деформации и в упрочненных образцах представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, способы нагружения образцов оказывают значительное влияние на изменение временных и остаточных напряжений. При наличии продольного перемещения индентора по направлению оси OY интенсивность напряжений и компоненты тензора напряжений увеличиваются. Степень упрочнения повышается за счет интенсификации напряжений в зоне деформации в следующей последовательности: упрочнение без вращения, упрочнение с вращением относительно $Z-Z$, упрочнение с вращением относительно $Z-Z$ под углом α . Выявлено, что кинематика движения деформирующего инструмента существенно влияет на временные и остаточные напряжения по всем осям координат OX, OY, OZ .

Если рабочий инструмент нагружается в осевом направлении, но не перемещается в продольном направлении относительно оси OY , компоненты временных и остаточных напряжений относительно осей OX и OY равны между собой (см. табл. 1). При наличии продольного перемещения рабочего инструмента напряжения в направлении оси OY увеличиваются независимо от схемы нагружения.

На рис. 4 представлено распределение компоненты тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя. Расчетами установлено, что максимальные осевые остаточные напряжения сжатия формируются на поверхности дета-

лей, а напряжения σ_y — в некоторой глубине слоя. При перемещении индентора в направлении главного движения σ_z возрастают на 25...30 %, а σ_x, σ_y — на 35...40 %.

Обработка ППД сопровождается упрочнением поверхностных слоев материала. При этом знание глубины проникновения эффективной пластической деформации, характеризующей область изменения физико-механических свойств, пред-

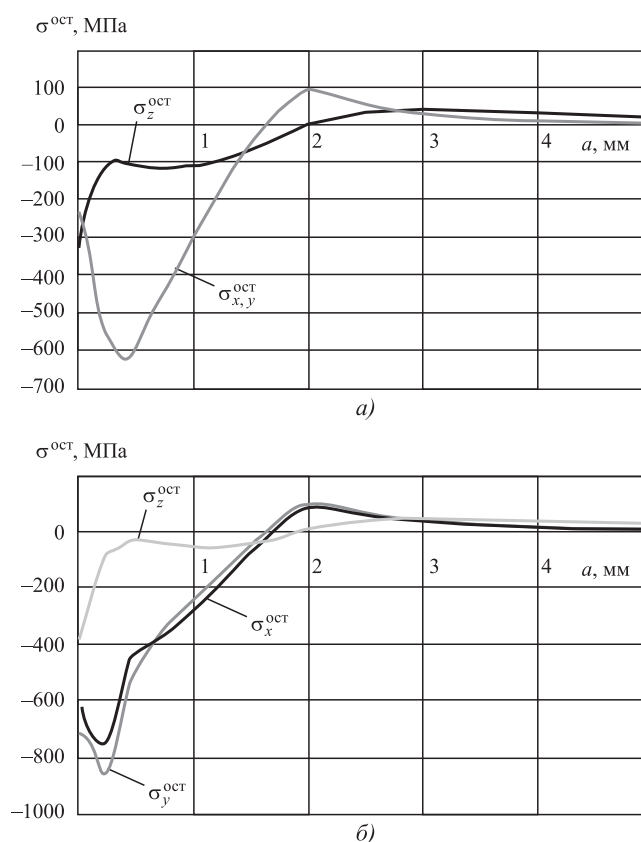


Рис. 4. Распределение компонентов тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя при нагружении по схеме рис. 1, в:

а — внедрение индентора без перемещения; б — внедрение индентора с продольным перемещением

Таблица 2

Влияние кинематики рабочего инструмента на глубину упрочненного слоя

Схема нагружения	Глубина упрочнения h , мм, при нагружении	
	без продольного перемещения индентора	с продольным перемещением индентора
Рис. 1, а	1,75	1,50
Рис. 1, б	1,70	1,55
Рис. 1, в	1,65	1,60

ставляет практический интерес для оценки эксплуатационных свойств деталей машин. В табл. 2 приведены значения глубины упрочнения в зависимости от схемы обработки.

При постоянной глубине внедрения рабочего инструмента и отсутствии продольного перемещения, с усложнением кинематики процесса глубина упрочненного слоя снижается примерно на 5...6 %. Эту закономерность можно объяснить тем, что при усложнении кинематики движения рабочего инструмента металл перемещается не только вглубь поверхностного слоя, но и в поперечных направлениях. При продольном перемещении инструмента с усложнением кинематики процесса глубина упрочненного слоя повышается на 5...6 %. Это происходит потому, что при продольном перемещении инструмента пластически деформируется дополнительный объем материала, который и повышает степень упрочнения и глубину упрочненного слоя.

Выводы

1. По результатам конечно-элементного моделирования и численного расчета установлено влияние кинематики движения рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и на формирование остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое деталей машин. Расчеты показали, что чем сложнее кинематика рабочего инструмента, тем выше рабочие и остаточные напряжения.

2. Вращение рабочего инструмента относительно собственной оси вызывает пульсацию напряжений, и чем сложнее кинематика процесса упрочнения, тем выше амплитуда пульсации.

3. Максимальные остаточные напряжения сжатия формируются не на поверхности, а на некоторой глубине упрочнения слоя, которая в условиях данного эксперимента составила 0,3...0,5 мм.

4. Продольное перемещение рабочего инструмента в направлении главного движения приводит к повышению напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненном слое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляк М.С. Технология упрочнения. В 2 т. Т. 2. М.: "Л.В.М. СКРИПТ", Машиностроение, 1995. 688 с.
2. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
3. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1978. 328 с.
4. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2 т. Т. 1 / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2014. 480 с.
5. Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием // Фундаментальные исследования. 2012. № 6—3. С. 642—646.
6. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
7. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
8. Зайдес С.А., Нго К.К. Технологическая интенсификация напряженного состояния в стесненных условиях локального нагружения // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 5—8.
9. Зайдес С.А., Нго К.К. Повышение напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5. С. 52—59.
10. Вишнеков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 253 с.
11. Зайдес С.А., Фам Ван Ань. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 5. С. 32—38.
12. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
13. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.
14. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. 503 с.
15. Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин В.Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 304 с.
16. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2017. 380 с.

А.Н. Овсенко, Д.Н. Клауч, Д.П. Носов, А.А. Пономарёв
(АО "НПО "ЦНИИТМАШ", г. Москва)
E-mail: 14otd@mail.ru

Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы

Изложена методика и разработаны расчетные зависимости для экспериментального определения осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин (дна) крупной резьбы. Приведены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя впадин наружной резьбы М64×6, построенные по изложенной методике.

Ключевые слова: резьба, впадина (канавка), поверхностный слой, образец продольный, вырезка, остаточные деформации, остаточные напряжения.

The technique is described and the calculated dependences are developed for the experimental determination of the axial residual stresses in the surface layer of the large thread vees bottom. The residual stresses diagrams along the depth of surface layer of external thread М64×6 vees determined by the described technique.

Keywords: thread, vee, surface layer, longitudinal specimen, cutting out, residual deformations, residual stresses.

Резьбовые соединения атомных установок, паровых, газовых и гидравлических турбин, парогенераторов, теплообменных аппаратов и других ответственных конструкций работают в условиях больших статических и динамических нагрузок, при повышенных температурах, радиационном облучении, в коррозионной среде. Эти факторы определяют высокие требования к прочности и надежности.

Типовым представителем крупных резьбовых соединений, в частности широко применяемых в атомных и энергетических установках, служит соединение с метрической резьбой М64×6 (рис. 1, см. обложку).

Впадины резьбы — сильные концентраторы напряжений, по которым в основном происходят усталостные разрушения. Поэтому технологический процесс обработки резьбы должен обеспечить ее заданную точность и сформировать поверхностный слой (ПС) с высокими эксплуатационными свойствами.

Наиболее важным показателем качества ПС, влияющим на сопротивление усталости, являются остаточные напряжения (их знак, величина и характер распределения). Их определение в ПС резьбы связано с большими трудностями.

Применительно к деталям с резьбой известные методы определения остаточных напряжений в ПС деталей с концентраторами напряжений требуют существенных уточнений [1, 2]. В поверхностном слое впадины резьбы наиболее надежно остаточные напряжения можно определить механическими разрушающими методами. Для этого из деталей с крупной резьбой методами, не влияющими на остаточные напряжения (без на-

грева и вибраций), необходимо вырезать продольные образцы (рис. 2, см. обложку).

Соотношение ширины b и толщины δ образца (b/δ) должно быть таким, чтобы напряженное состояние в ПС образцов в зоне впадины можно было считать одноосным. При этом толщина образца должна в 3–5 раз превышать глубину исследуемого напряженного слоя a , а ширина продольного образца ограничивается соотношением [1]

$$b \leq 0,4\sqrt{R_H\delta},$$

где R_H — радиус наружной поверхности образца.

Размеры образцов должны обеспечить необходимую точность измерения деформаций, возникающих в результате вырезки и при последующем удалении ПС с остаточными напряжениями.

Остаточные напряжения $\sigma_0(a)$ в продольном образце с учетом вырезки и разрезки

$$\sigma_0(a) = \sigma_0^0(a) + \sigma_0^B(a),$$

где $\sigma_0(a)$ — остаточные напряжения в вырезанном продольном образце;

$\sigma_0^B(a)$ — изменения остаточных напряжений в продольном образце в результате вырезки.

Определение осевых остаточных напряжений

Осевые остаточные напряжения, действующие в направлении продольной оси резьбы, определяли на вырезанном продольном образце. Схемы вырезки и размеры образца для шпильки с резьбой М64×6 приведены на рис. 3. Перед вырезкой

на вершине резьбы по образующей (параллельно продольной оси шпильки) наносили риски и измеряли прямолинейность образующей по трем точкам (две — на краях, одна — в середине вырезаемого образца). После вырезки способом, не влияющим на остаточные напряжения, в тех же трех точках определяли стрелу прогиба f_0 в середине образца. Вершины резьбы удаляли с последующим электрохимическим травлением плоскостей вырезки образца с двух сторон до общей толщины образца 2,5...3,2 мм и толщины в зоне впадины резьбы 1,5...0,2 мм (рис. 4).

В результате вырезки образца происходит нарушение равновесия исходных остаточных напряжений, и возникают остаточные деформации образца (изгиб и изменение длины). Исходные остаточные напряжения изменяются на величину

$$\sigma_0^B(a) = \sigma_{и}^B(a) + E\varepsilon_B,$$

где $\sigma_{и}^B(a)$ — изменение остаточных напряжений в результате изгиба вырезанного образца;

$E\varepsilon_B$ — изменение остаточных напряжений в результате продольной деформации ε_B вырезанного образца;

E — модуль упругости материала образца.

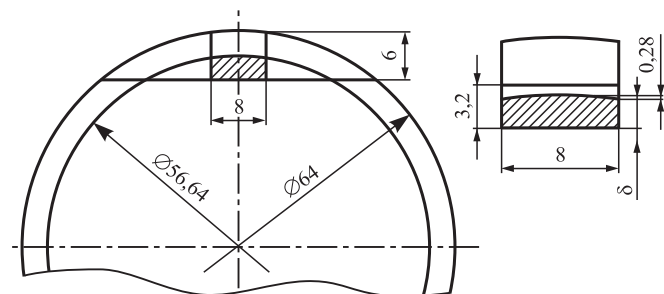


Рис. 3. Размеры и схема вырезки продольного образца из шпильки М64×6, длина образца $l = 60...80$ мм, толщина $\delta = 1,5...2,2$ мм

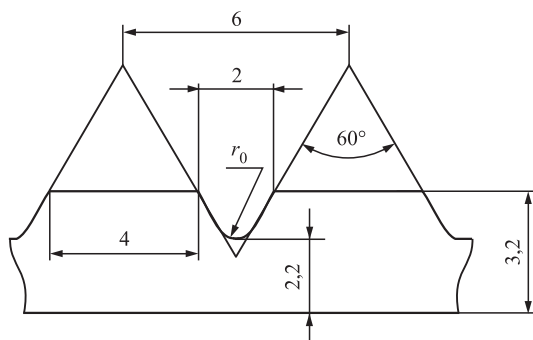


Рис. 4. Размеры продольного (осевого) образца в зоне впадины резьбы М64×6

Так как при механической обработке на чистовых режимах относительная толщина измененного ПС, который вызывал дополнительные остаточные напряжения, небольшая ($a/\delta < 0,1$), с достаточной точностью можно считать $\varepsilon_B = 0$ и учитывать изменение напряжений при вырезке только от изгибных деформаций ($\sigma_0^B(a) = \sigma_{и}^B(a)$). Схема нагружения продольного образца приведена на рис. 5. Принимаем, что на ширине впадины l_0 действует постоянный (усредненный) изгибающий момент $M_{и}$, а дно впадины прямолинейное (плоское).

Для схемы нагружения, приведенной на рис. 5:

$$f_0 = \frac{l_0 M_{и}}{EJ(0)} \sum_{i=1}^n \bar{M}_i,$$

где l_0 — ширина впадины резьбы;

$M_{и}$ — изгибающий момент в зоне впадины резьбы, возникающий при вырезке образца;

$J(0)$ — момент инерции поперечного сечения образца в зоне впадины резьбы (до удаленного слоя a);

n — число впадин на общей длине образца, $n = l/S$;

E — модуль упругости материала образца;

\bar{M}_i — изгибающий момент от единичной силы ($P = 1$) на i -м участке образца.

Максимальные напряжения на поверхности впадины резьбы $\sigma_{и}^{\max}$ и напряжения на глубине a , возникающие при изгибе образца $\sigma_{и}^B(a)$, определяются по зависимостям

$$\sigma_{и}^{\max} = \frac{\delta M_{и}}{2J(0)};$$

$$\sigma_{и}^B(a) = \sigma_{и}^{\max} \left(1 - 2 \frac{a}{\delta}\right) = \frac{M_{и}}{2J(0)} (\delta - 2a);$$

$$\sigma_{и}^B(a) = \frac{E f_0}{2l_0 \sum_{i=1}^n \bar{M}_i} (\delta - 2a).$$

В соответствии с рис. 5

$$\bar{M}_1 = \frac{S}{4}; \bar{M}_2 = \frac{3}{4}S; \bar{M}_3 = \frac{5}{4}S \text{ и т.д. до } \frac{n}{2};$$

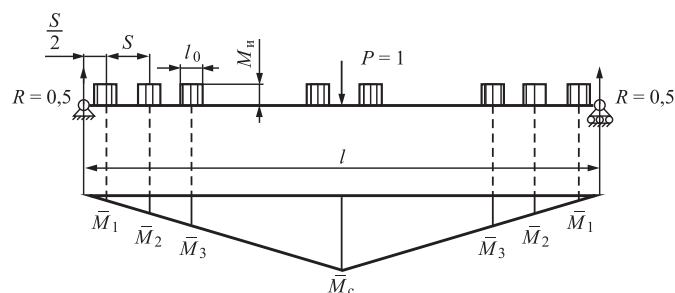


Рис. 5. Схема нагружения продольного образца и эпюра изгибающих моментов от единичной силы

$$\sum_{i=1}^n \bar{M}_i = \frac{S}{2} \sum_{i=1}^{n/2} (2i - 1);$$

$$\sigma_{ii}^B(a) = \frac{E f_0 (\delta - 2a)}{l_0 S \sum_{i=1}^{n/2} (2i - 1)},$$

где n — четное число.

Определение нелинейной составляющей остаточных напряжений в ПС впадины резьбы проводили с использованием специальной методики и установки. На конце образца, как его продолжение или перпендикулярно к его продольной оси, закрепляли рычаг-увеличитель длиной L . Все поверхности образца и рычага, кроме дна резьбы, изолировали и образец с рычагом-увеличителем монтировали в установку. Поверхностный слой дна резьбы подвергали травлению, в процессе которого по перемещениям $F(a)$ конца рычага-увеличителя измеряли деформацию (стрела прогиба) образца $f(a)$ (рис. 6).

При схеме нагружения и измерения деформаций образца по перемещениям рычага-увеличителя (см. рис. 6), формула для расчета $F(a)$ имеет следующий вид:

$$F(a) = \frac{l_k^2 n^2}{2E} \frac{M(a)}{J(a)},$$

где $l_k = l_0 + 2a$;

$M(a)$ — изгибающий момент, возникающий в результате удаления слоя a с остаточными напряжениями $\sigma_0^0(a)$ с каждого участка (впадины);

$J(a)$ — момент инерции поперечного сечения образца на участке травления после удаления напряженного слоя a ;

$l_k n$ — общая длина участков травления.

В случае установки рычага-увеличителя перпендикулярно к оси образца на его конце

$$\bar{M}_i = \bar{M} = L;$$

$$F(a) = \frac{M(a) l_k}{E J(a)} \sum_{i=1}^n \bar{M}_i = \frac{l_k n L}{E} \frac{M(a)}{J(a)}.$$

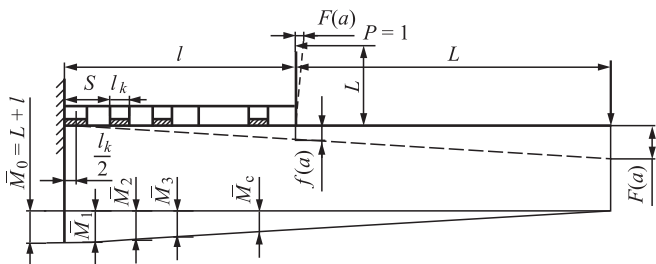


Рис. 6. Схема измерения деформаций образца с использованием рычага-увеличителя и эпюра изгибающих моментов от единичной силы ($P = 1$)

Представим последнее выражение в следующем виде (с коэффициентом увеличения k_n):

$$F(a) = \frac{l_k^2 n^2}{2E} \frac{M(a)}{J(a)} k_n;$$

$$k_n = \frac{2L}{l_k n}.$$

При травлении ПС на всей длине образца $n = 1$, $l_0 = S = l$, тогда

$$k_n = \frac{2L}{l}.$$

Для образцов с поперечным сечением, близким к прямоугольной форме шириной b и толщиной δ , момент инерции и изгибающий момент, возникающий в результате удаления слоя a с остаточными напряжениями $\sigma_0^0(x)$ определяются следующими зависимостями:

$$J(a) = \frac{b(\delta - a)^3}{12};$$

$$M(a) = \frac{b(\delta + a)}{2} \int_0^a \sigma_0^0(x) dx - b \int_0^a \sigma_0^0(x) x dx.$$

Тогда

$$F(a) = k \frac{3l_k^2 n^2}{E(\delta - a)^3} \left[(\delta + a) \int_0^a \sigma_0^0(x) dx - 2 \int_0^a \sigma_0^0(x) x dx \right],$$

где $k = k_b$ для случая установки рычага-увеличителя вдоль образца;

$k = k_n$ для случая установки рычага-увеличителя перпендикулярно к продольной оси образца.

Приведем полученную формулу к следующему виду:

$$F(a) \frac{E(\delta - a)^3}{3kn^2 l_k^2} = (\delta + a) \int_0^a \sigma_0^0(x) dx - 2 \int_0^a \sigma_0^0(x) x dx.$$

Продифференцировав правую и левую части выражения по параметру a , после соответствующих преобразований получаем формулу для расчета $\sigma_0^0(a)$ в вырезанном образце в следующем виде:

$$\sigma_0^0(a) = \frac{E(\delta - a)^3}{3kn^2 l_k^2} \left\{ (\delta - a) \frac{dF(a)}{da} - \right.$$

$$\left. - F(a) \left[3 + (\delta - a) \left(\frac{1}{k} \frac{dk}{da} + \frac{4}{l_k} \right) \right] \right\} - \frac{1}{\delta - a} \int_0^a \sigma_0^0(x) dx.$$

Для образца с рычагом-увеличителем, установленным перпендикулярно к оси образца:

$$\frac{dk}{da} = \frac{dk_n}{da} = -\frac{4L}{nl_k^2};$$

$$\sigma_0^0(a) = \frac{E(\delta - a)}{6nl_k L} \left[(\delta - a) \frac{dF(a)}{da} - \left(3 + \frac{2(\delta - a)}{l_k} \right) F(a) \right] - \frac{1}{(\delta - a)} \int_0^a \sigma_0^0(x) dx.$$

Для бесконечно тонкого ПС ($a = 0$), $F(0) = 0$, $l_k = l_0$ формула имеет более простой вид

$$\sigma_0^0(0) = \frac{E\delta^2}{3kn^2l_0^2} \frac{dF(0)}{da}.$$

На рис. 7 (см. обложку) приведен экспериментальный график перемещений $F(a)$ вдоль установленного рычага-увеличителя $L = 41$ мм, а также определенные по разработанной методике осевые остаточные напряжения в поверхностном слое впадин резьбы М64×6 на вырезанном образце с учетом и без учета его вырезки из детали. Характеристики вырезанного образца: $l_0 = 2$ мм; $S = 6$ мм; $n = 10$; $a = 0,3$ мм; $\delta = 2,2$ мм; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Прогиб в середине образца после вырезки $f_0 = -0,02$ мм (сторона со впадинами выпуклая) вызвал изменение исходных остаточных напряжений в поверхностном слое на величину

$$\sigma_{и}^B(a) = \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,02(2,2 - 2a)}{2 \cdot 6 \cdot 25} = -28(1,1 - a).$$

На поверхности впадин ($a = 0$) $\sigma_{и}^B(0) = -40,8$ МПа, на глубине $a = 0,3$ мм, $\sigma_{и}^B(0,3) = -60,4$ МПа.

Выполненные исследования показывают, что разработанная методика экспериментального определения осевых остаточных напряжений во впадинах крупных резьб позволяет определять эпюру распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после различных методов обработки.

По характеру остаточные напряжения могут быть как напряжениями сжатия, так и напряжениями растяжения и достигать значений, которые необходимо учитывать при расчетах на прочность высоконагруженных резьбовых соединений различных изделий машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Технологические** остаточные напряжения / А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев, Г.З. Серебренников. М.: Машиностроение, 1973.
2. **Технологические** остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Г.В. Коновалов, Б.В. Минин. М.: МАП. Отраслевая библиотека "Технический прогресс и повышение квалификации", 1992.

УДК 621.787.4:62-47

А.В. Щедрин, В.Ф. Алешин, А.М. Бугаев, Л.Х. Минязева
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана),
Н.Ю. Чихачёва
(МОО "Академия проблем качества", МБОУ СОШ № 1, г. Покров)
E-mail: miluiza@yandex.ru

Теоретико-экспериментальное исследование и совершенствование методов дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях противодействия технологических смазок

На основании общего решения А.Л. Воронцова получена теоретическая модель сил дорнования отверстия в полых цилиндрических заготовках инструментом с регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей в условиях самовозбуждаемого противодействия различных технологических смазок.

Ключевые слова: сила дорнования, регулярный микрорельеф, технологическая смазка.

Theoretical model of mandreling forces of hole in hollow cylindrical workpieces by regular acting surfaces microgeometry tool under of self-excited back-pressure conditions of various process lubricants is obtained on basis on general A.L. Vorontsov decision.

Keywords: mandreling force, regular microrelief, process lubricant.

Как показывает системный структурно-параметрический анализ [1, 2], методы дорнования отверстий инструментом с иррегулярной микро-

геометрией воздействующих поверхностей [3–5] характеризуются повышенными силами обработки, которые относятся к динамическим характе-

ристикам реализуемых технологических схем [6]. Для уменьшения сил дорнования и повышения качества обработки в работах [7, 8] предложено применять инструмент с регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей [9, 10], который обеспечивает свободное истечение технологической смазки через отверстие дорнуемой заготовки при сокращении объема смазочной полости (рис. 1) и реализацию более благоприятного режима трения, близкого к жидкостному [11].

Для выбора необходимого оборудования (пресса, протяжного станка, волочильного стана) необходимо точно знать требуемую силу дорнования.

На основании общего решения А.Л. Воронцова [12] при нулевой деформации наружной поверхности полой цилиндрической заготовки (см. рис. 1) получена математическая модель сил дорнования инструментом с регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей в условиях само-

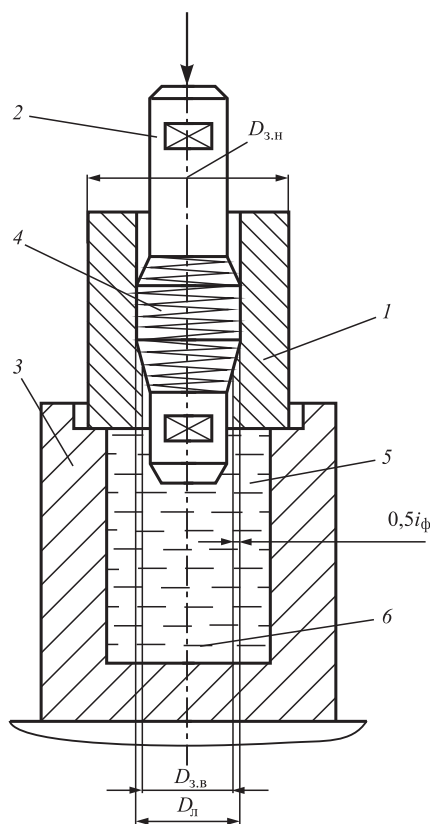


Рис. 1. Схема дорнования отверстий в полой цилиндрической заготовке в условиях самовозбуждающего противодействия технологических смазок:

1 — полая цилиндрическая заготовка; 2 — однозубая дорн-прошивка; 3 — обойма; 4 — регулярный микро рельеф воздействующих поверхностей деформирующего элемента дорн-прошивки; 5 — смазочная полость; 6 — запас технологической смазки

возбуждаемого противодействия смазывающе-охлаждающих технологических сред:

$$\begin{cases} q_d^T = 1,155\bar{\sigma}_s \left[\left(1 + \frac{f}{\sin \alpha} \right) \ln \left(\frac{D_{3,н} - D_{3,в}}{D_{3,н} - D_л} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\sin \alpha}{(1 + \cos \alpha)} + \frac{2L_л f D_л}{(D_{3,н}^2 - D_л^2)} \right] \frac{(D_{3,н}^2 - D_{3,в}^2)}{4D_л}; \\ F_d^T = \pi q_d^T D_л, \end{cases} \quad (1)$$

где q_d^T — теоретическая удельная сила дорнования, Н/мм;

$\bar{\sigma}_s$ — среднее по очагу деформации напряжение текучести обрабатываемого материала, МПа;

f — коэффициент трения скольжения;

α — угол рабочего конуса деформирующего элемента дорна, °;

$D_{3,н}$ — наружный диаметр полой цилиндрической заготовки, мм;

$D_{3,в}$ — внутренний диаметр отверстия полой цилиндрической заготовки, мм;

$D_л$ — диаметр деформирующего элемента дорна по калибрующей ленточке, мм;

$L_л$ — ширина калибрующей ленточки деформирующего элемента, мм;

F_d^T — теоретическая суммарная сила дорнования, Н.

Коэффициент трения скольжения f определяли по формуле (1), полученной на основе адгезионно-деформационной теории трения И.В. Крагельского в виде суммы адгезионной f_a и деформационной f_d составляющих:

$$f = f_a + f_d. \quad (2)$$

В качестве объекта проверки достоверности теоретической модели удельной силы дорнования q_d^T примем метод дорнования отверстий прошивкой с деформирующим элементом, воздействующие поверхности которого упрочнены регулярной микрогеометрией в условиях самовозбуждаемого противодействия технологической смазки [11].

В качестве экспериментальных образцов использовали полые цилиндрические заготовки из стали 12ХН3А (171...214 НВ) с наружным диаметром $D_{3,н} = 39$ мм и длиной $L_3 = 40$ мм. Предварительная обработка отверстий полых цилиндрических заготовок — растачивание.

В качестве инструмента использовали сборную прошивку-дорн (см. рис. 1) со сменными деформирующими элементами из стали Р6М5. Воздействующие поверхности деформирующего элемента упрочняли однозаходным винтовым регулярным микро рельефом с радиусом канавок

1,5 мм, шагом 0,5 мм и первоначальной глубиной на участке калибрующей ленточки 8 мкм [8–11].

В качестве технологической смазки применяли сульфозфрезол. Скорость дорнования 4 м/мин. Исходные значения теоретической удельной силы дорнования q_d^T представлены в таблице.

Теоретическая (расчетная) удельная сила дорнования составляет:

$$q_d^T = 216,48 + 2314,7i_{\phi}. \quad (3)$$

Экспериментальная удельная сила дорнования, Н/мм, также с противодействием смазки [11]:

$$q_d^3 = 230,26 + 2021,42i_{\phi}. \quad (4)$$

Из сопоставления данных таблицы следует, что в диапазоне $i_{\phi} = 0,05...0,25$ мм относительная погрешность теоретической (расчетной) и экспериментальной удельной силы дорнования

$$\Delta q_d = \left[\frac{q_d^3 - q_d^T}{q_d^3} \cdot 100 \% \right] \text{ составляет } -0,27...8,08 \%. \quad (5)$$

При этом теоретическая (3) и экспериментальная (4) зависимости сходятся при $i_{\phi} = 0,0469$ мм.

Таким образом, предложенная математическая модель сил дорнования отверстий в полых цилиндрических заготовках обеспечивает достаточно точное определение энергосиловых и точностных параметров технологического оборудования, необходимого для проведения соответствующих технологических операций.

С применением алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" [1, 2, 6] разработан инновационный метод дорнования отверстий полых цилиндрических заготовок в обойме [4, 13] с противодействием технологических смазок (рис. 2). Предварительно в отверстие и на наружной поверхности обрабатываемой заготовки 1 в соответствии с работами [14–17] выполняют регулярный микрорельеф (на рисунке не показан). Заготовку 1 устанавливают с зазором в обойму 2 с базированием по нижнему торцу на выталкиватель 3. Внутренняя поверхность обоймы 2 имеет регулярный микрорельеф 4. При заполнении внутренней полости обоймы 2 металлоплакирующей смазкой 5 [18], реализующей "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского" [20], и перемещении дорна 6 с регулярным микрорельефом 7, аналогично работам [7, 8, 11, 19] и схеме на рис. 1,

линейных параметров технологического оборудования, необходимого для проведения соответствующих технологических операций.

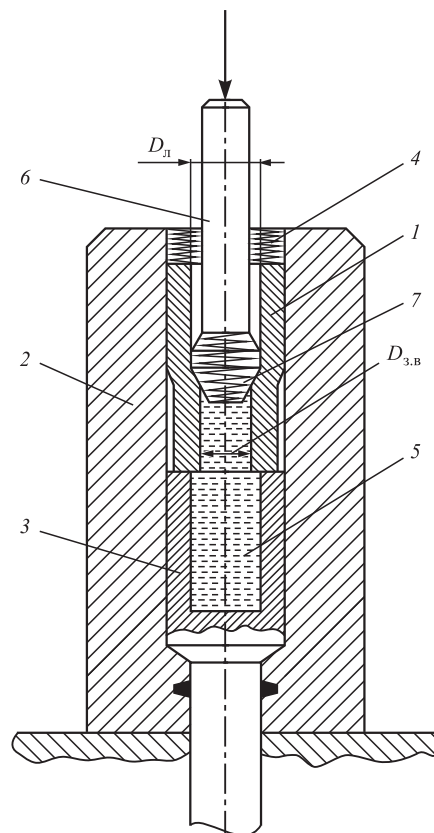


Рис. 2. Схема инновационного метода дорнования отверстий полых цилиндрических заготовок в обойме с противодействием современных металлоплакирующих смазок

**Исходные данные
для расчета теоретической силы дорнования**

Параметр	Значение		
i_{ϕ}^* , мм	0,05	0,15	0,25
$D_{з.н}$, мм	39	39	39
L_3 , мм	40	40	40
$D_{з.в}$, мм	21,95	21,85	21,75
$D_л$, мм	22	22	22
α , °	8	8	8
$L_л$, мм	10	10	10
f_a	0,0190	0,0049	0,0038
f_d	0,0299	0,1160	0,1500
f	0,0489	0,1210	0,1538
$\bar{\sigma}_s$, МПа	249,69	310,86	344,15
q_d^T , Н/мм	332,20	563,68	795,10
q_d^3 , Н/мм	331,30	533,47	735,60
Δq_d , %	-0,27	-5,66	-8,08

* i_{ϕ} — абсолютная фактическая деформация отверстия полой цилиндрической заготовки.

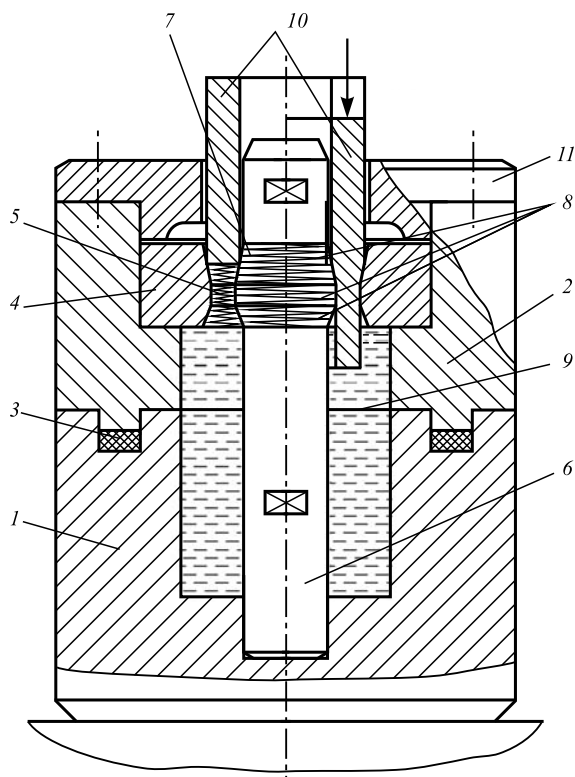


Рис. 3. Инновационный метод совмещенного редуцирования-дорнования с противодействием современных металлолакирующих смазок

создается более благоприятный режим деформирования. Заготовка 1 выпрессовывается из обоймы 2 с помощью выталкивателя 3.

Существующий метод совмещенного редуцирования-дорнования [12] можно кардинально усовершенствовать. В схеме, приведенной на рис. 3, используется сборная обойма, состоящая из нижней 1 и верхней 2 частей. Части обоймы 1 и 2 имеют лабиринтный стык с уплотнительным элементом 3. В верхней части 2 обоймы закреплена редуцирующая фильера 4, рабочий канал которой упрочнен регулярным микрорельефом 5 [1, 15]. Концентрично фильере 4 в нижней части 1 обоймы установлен дорн 6, деформирующий элемент 7 которого упрочнен регулярным микрорельефом 8 [1, 8–11]. Сборная обойма, состоящая из частей 1 и 2, имеет внутреннюю полость 9 для размещения запаса металлолакирующей смазки [18–20]. Обрабатываемая заготовка 10 проталкивается в кольцевой зазор между фильерой 4 и дорном 6, дополнительно центрируясь по крышке 11. При этом происходит сокращение объема полости 9 сборной обоймы, в результате чего металлолакирующая смазка под давлением свободно истекает по канавкам регулярного микрорельефа воздействую-

щих поверхностей фильеры 4 и дорна 6 аналогично схемам, приведенным на рис. 1 и 2 и в работах [7, 8, 11, 19]. Для существенного уменьшения сил обработки все поверхности заготовки 10, включая ее торцы, имеют регулярный микрорельеф [1].

Логическим продолжением схемы обработки, приведенной на рис. 3, является схема, показанная на рис. 4, которая может применяться для изготовления длинномерных трубных изделий (патент РФ № 2593062). Наружная поверхность длинномерной полой (трубной) заготовки 1 обрабатывается сдвоенными фильерами 2, 3, рабочие каналы которых последовательно упрочнены регулярным микрорельефом и пленочным износостойким покрытием (на рисунке не показаны) (патент РФ № 2560477). Одновременно внутренняя поверхность (отверстие) заготовки 1 обрабатывается дорном ("плавающей оправкой") 4, также имеющим регулярный микрорельеф 5 и пленочное износостойкое покрытие. На сопряженных торцах фильер 2 и 3 выполнены радиальные пазы 6, 7 для подачи под давлением металлолакирующей смазки в очаг деформации, для снижения трения [15–20]. Перед обработкой внутренняя полость заготовки 1 односторонне герметизируется резинометаллической заглушкой 8 и заполняется металлолакирующей смазкой 9. При движении заготовки 1 происходит сокращение объема ее внутренней полости и смазка 9 под давлением по осевому каналу 10 и радиальным каналам 11 дорна-оправки 4 попадает в очаг деформации по канавкам регулярного микрорельефа 5. В конце рабочего хода заготовки 1 заглушка 8 удаляется задним торцом дорна-оправки 4.

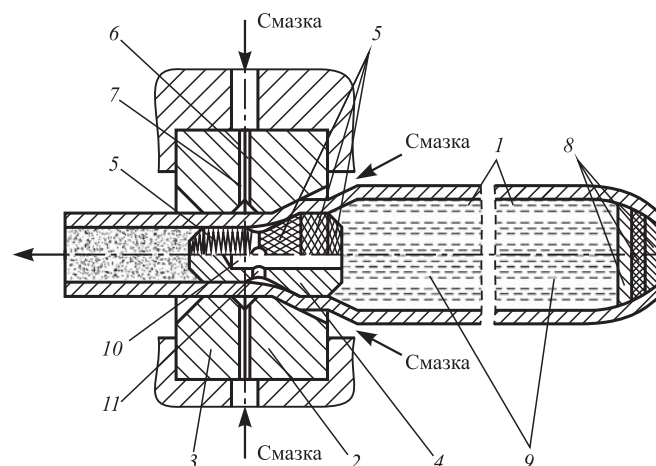


Рис. 4. Инновационный метод обработки длинномерных полых заготовок с противодействием современных металлолакирующих смазок

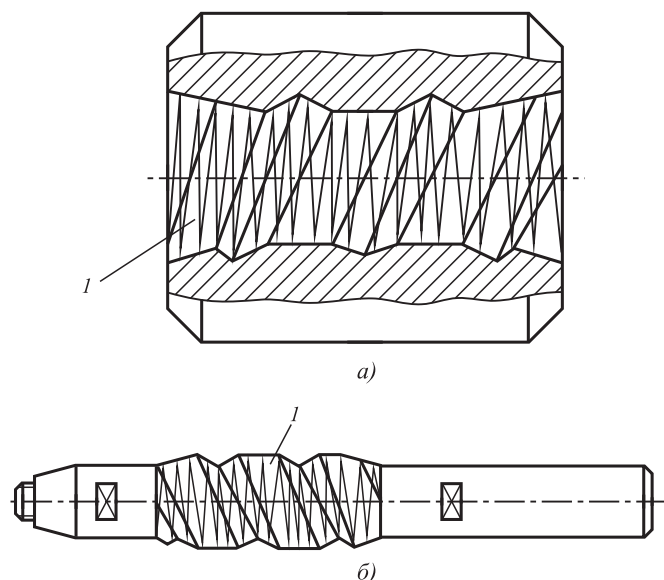


Рис. 5. Инновационные инструменты:
а — винтовая фильера; б — винтовой дорн

Возможно также применение инструментов с винтовой макрогеометрией воздействующих поверхностей (рис. 5), на которые наложен регулярный микрорельеф 1.

Данные позволяют расширить информационную базу для принятия оптимально-эффективных решений при технологической подготовке соответствующих производств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Щедрин А.В. и др. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологичных объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
- Ярославцев В.М. Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". 2007. № 2. С. 56—70.
- Проскуряков Ю.Г., Евстигнеев Е.А. Дорнование отверстий втулок с гидравлическим противодавлением // Машиностроитель. 1973. № 3. С. 35—36.
- Проскуряков Ю.Г., Федотов В.И. Дорнование отверстий деталей // Машиностроитель. 1971. № 7. С. 34.
- Янченко И.И., Тарасов В.В., Сивцев Н.С. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием. В 2 ч. Ч. 1: Теория управления контактно-кинематическими условиями при дорновании. Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2002. 138 с.
- Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю. Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.

- Пат. 2063861 РФ. Способ деформирующе-режуще-выглаживающего прошивания — редуцирования поверхностей и устройство для его осуществления / М.И. Грошев, А.В. Щедрин.

- Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бекаев А.А. Комплексное исследование эффективности метода комбинированной прошивки отверстий с противодавлением технологической смазки // Технология машиностроения. 2009. № 9. С. 17—20.

- Щедрин А.В., Таненгольц А.Б. Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий // Машиностроитель. 2002. № 11. С. 20—23.

- Щедрин А.В. и др. Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхностей рабочих элементов инструмента // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 51—52.

- Щедрин А.В. и др. Совершенствование технологии применения смазывающе-охлаждающих технологических сред в комбинированных методах обработки проката // Вестник машиностроения. 2006. № 10. С. 51—52.

- Воронцов А.Л. Промышленное опробование результатов исследования совмещенного процесса редуцирования-дорнования // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 9. С. 3—10.

- Проскуряков Ю.Г., Акименко Ю.А., Суханов Э.С. и др. Дорнование отверстий тонкостенных деталей в обоймах // Вестник машиностроения. 1971. № 12. С. 37—41.

- Щедрин А.В. и др. Повышение эффективности комбинированного дорнования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности отверстия обрабатываемой заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 7. С. 314—317.

- Щедрин А.В., Кострюков А.А. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 13. № 11. С. 495—498.

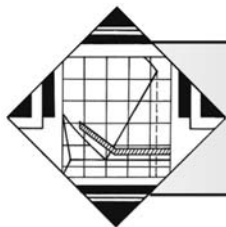
- Щедрин А.В. и др. Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования заготовок из алюминиевых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 7. С. 291—296.

- Пат. 2647057 РФ. Способ холодного пластического деформирования металлов / А.А. Кострюков, Э.Л. Мельников, М.А. Серезжин и др.

- Щедрин А.В. и др. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76—79.

- Щедрин А.В. и др. Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2016. № 9. С. 30—35.

- Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В. Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности) // Диплом № 41. Открытия в СССР 1957—1967 гг. М.: ЦНИИПИ, 1968.



Вакуумное упрочнение одно- и двухкарбидных твердых сплавов

Эксплуатационные характеристики твердых сплавов во многом зависят от их химического состава, условий получения, структуры, фазового состава, размеров блоков кристаллической решетки, микронапряжений. Методами повышения физико-механических свойств твердосплавных пластин, в основном, являются методы совершенствования технологии изготовления, в том числе получение мелкозернистой структуры сплавов и микролегирование. Проведены исследования возможности повышения физико-механических и эксплуатационных свойств сплавов VK8 и T14K8 путем отжига в вакууме при температурах: 1050, 1150 и 1250 °С. В связи с этим возникла необходимость исследования процессов термической обработки сплавов с использованием нагрева в соляных ваннах и безокислительных средах, широко применяемых на машиностроительных заводах.

Ключевые слова: твердые сплавы VK8 и T14K8, термообработка, отжиг в вакууме, твердость, микроструктура, износ.

The operating characteristics of hard alloys largely depend on the chemical composition, production conditions, structure, phase composition, size of the crystal lattice units, microstresses. Methods for improving the physical and mechanical properties of carbide inserts are mainly methods for improving manufacturing technology, including the production of fine-grained alloys and microalloying. The main way to improve operating characteristics is heat treatment. The possibility for increasing of the physical, mechanical and operational properties of alloys VK8 and T14K8 by vacuum annealing at temperatures: 1050, 1150 and 1250 °C is studied. In this regard, it became necessary to study the heat treatment processes using heating in salt baths and non-oxidizing media, widely used in engineering plants for steels.

Keywords: hard alloys VK8 and T14K8, heat treatment, vacuum annealing, hardness, microstructure, wear.

Эксплуатационные характеристики твердых сплавов во многом зависят от их химического состава, условий получения, структуры, фазового состава, размеров блоков кристаллической решетки, наличия микронапряжений. Повысить физико-механические свойства твердосплавных пластин можно совершенствуя технологию их изготовления, в том числе с помощью получения мелкозернистой структуры сплавов и микролегирование [1–10]. Основным способом повышения эксплуатационных характеристик является термическая обработка.

Исследовали влияние отжига в вакууме при температурах 1050, 1150, 1250 °С на физико-механические и эксплуатационные свойства твердых сплавов VK8 и T14K8 (рис. 1).

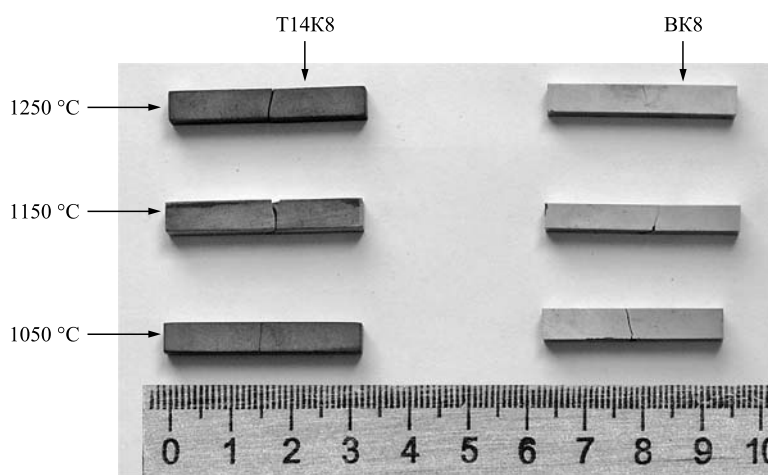


Рис. 1. Образцы из твердых сплавов VK8 и T14K8

Физико-механические свойства исходных и отожженных в вакууме образцов из твердых сплавов ВК8 и Т14К8

Марка материала	Температура отжига, °С	Размеры, мм			F, Н	M, Н·м	Предел прочности при сжатии, Н/мм ²	Среднее значение предела прочности, Н/мм ²
		Ширина	Высота	Длина				
Т14К8	Без отжига	5,00	5,10	34,00	6176	52 496	2422	2146
		5,20	5,33	34,00	5414	46 019	1869	
	1050	5,26	5,32	34,00	4067	34 569,5	1393	1841
		5,10	5,10	34,00	5539	47 081,5	2130	
		5,22	5,27	34,00	5682	48 297	1999	
	1150	5,23	5,30	34,00	4956	42 126	1720	1907
		5,10	5,10	34,00	5834	49 589	2243	
		5,22	5,27	34,00	5000	42 500	1759	
	1250	5,25	5,32	34,00	4092	34 782	1405	1619
		5,00	5,10	34,00	4945	42 032,5	1939	
		5,23	5,33	34,00	4406	37 451	1512	
	ВК8	1050	4,76	5,20	32,00	7877	63 016	2938
4,83			5,26	32,00	6620	52 960	2378	
4,64			4,70	32,00	4417	35 336	2068	
4,50			4,70	32,00	6295	50 360	3040	
5,09			5,30	32,00	7926	63 408	2661	
1150		4,57	4,95	32,00	5200	41 600	2229	2312
		4,62	5,12	32,00	3999	31 992	1585	
		4,98	5,12	32,00	7883	63 064	2898	
		4,50	5,00	32,00	5555	44 440	2370	
1250		5,13	5,30	32,00	7433	59 464	2476	1714
		4,42	5,01	32,00	4127	33 016	1786	
		4,34	4,94	32,00	3008	24 064	1363	
		4,68	4,67	32,00	3596	28 768	1691	
		4,60	5,00	32,00	5292	42 336	2209	
			4,73	5,27	32,00	4170	33 360	1524

Обозначения: F — разрушающая сжимающая сила; M — разрушающий момент.

До и после отжига были определены размеры образцов, их твердость и предел прочности на сжатие (табл. 1, 2 и рис. 2). Характеристика исследуемых образцов после нагрева в вакууме приведена в табл. 3.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований показали, что отжиг в вакууме эффективно проводить для сплава ВК8. С повышением температуры предел прочности повышается, а твердость остается примерно на том же уровне. Лучший режим отжига при температуре 1050 °С. Прочность увеличилась примерно в 2 раза.

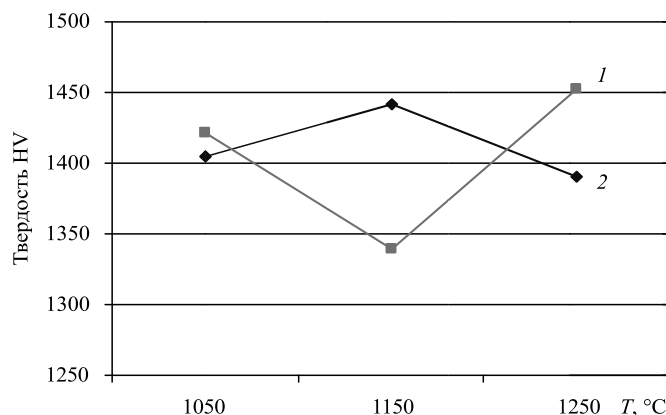


Рис. 2. Зависимость твердости сплавов ВК8 (1) и Т14К8 (2) от температуры отжига в вакууме

Таблица 2

Зависимость твердости образцов из сплавов ВК8 и Т14К8 от температуры отжига в вакууме

Марка материала	Форма образца	Температура отжига, °С	Твердость HV	Твердость средняя HV
ВК8	Штабик	1050	1402	1421
			1444	
			1470	
			1378	
			1410	
Т14К8	Штабик	1050	1533	1405
ВК8	5-гранная пластинка		1356	
			1325	
ВК8	5-гранная пластинка	1150	1445	1445
ВК8	Штабик		1411	
			1355	
			1288	
			1332	
Т14К8	Штабик	1150	1310	1339
ВК8	5-гранная пластинка		1493	
			1478	
Т14К8	Штабик	1250	1355	1442
ВК8	5-гранная пластинка		1493	
			1478	
ВК8	5-гранная пластинка	1250	1365	1365
ВК8	Штабик		1367	
			1497	
			1497	
			1479	
Т14К8	Штабик	1250	1419	1452
ВК8	5-гранная пластинка		1395	
			1387	
ВК8	5-гранная пластинка	1250	1394	1392
Т14К8	Штабик		1419	
			1419	

Таблица 3

Характеристика исследуемых образцов после нагрева в вакууме

T, °С	ВК8	Т14К8
1050	Ширина и высота образцов увеличились на 3...5 %, длина осталась прежней. Твердость уменьшилась на 10 %, предел прочности увеличился в 2 раза	Ширина и высота образцов увеличились на 3...5 %, длина осталась прежней. Твердость уменьшилась на 30 %, предел прочности — на 20 %
1100	Длина прежняя, ширина и высота увеличились на 3...5 %. Твердость осталась прежней, предел прочности увеличился в 1,5...1,6 раза	Ширина и высота образцов увеличились на 3...5 %, длина осталась прежней. Твердость уменьшилась на 20 %, предел прочности — на 30 %
1150	Ширина и высота увеличились на 3...5 %, длина прежняя. Твердость увеличилась на 10 %, предел прочности — на 10...20 %. Износ пластин уменьшился на 30 % и составил 0,6 мм	Ширина, высота увеличились на 3...5 %, длина прежняя. Твердость уменьшилась на 40 %, предел прочности — на 50 %. Износ пластин уменьшился с 0,2 до 0,16 мм

Для сплава Т14К8 проведение вакуумного отжига приводит к ухудшению свойств на 20...50 %.

После проведения отжига в вакууме твердых сплавов ВК8 и Т14К8 при различных температурах были приготовлены шлифы для исследований микроструктуры данных сплавов при различных увеличениях.

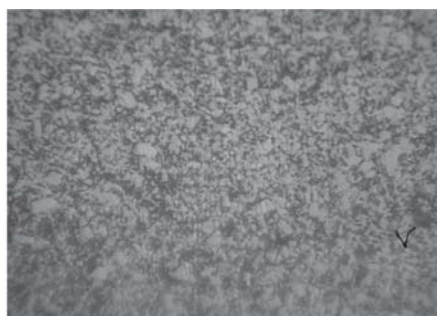
Повышение температуры отжига от 1050 до 1250 °С привело к увеличению растворимости карбидов вольфрама в карбиде титана для сплава Т14К8 и огрублению структуры в виде белых включений и уменьшению предела прочности при изгибе и твердости.

При увеличении температуры отжига структура твердого сплава ВК8 изменяется следующим образом: измельчаются карбидные включения и увеличивается количество темной фазы β-кобальт, что ведет к повышению твердости и предела прочности образцов (рис. 3—8).

Влияние температуры отжига на износ поверхности (табл. 4) твердых сплавов ВК8 и Т14К8 изучено в следующей серии экспериментов. С повышением температуры отжига от 1050 до



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура твердого сплава ВК8 после отжига при температуре 1050 °С, 1421 HV, износ 0,02 мм:

а — ×640; б — ×1280

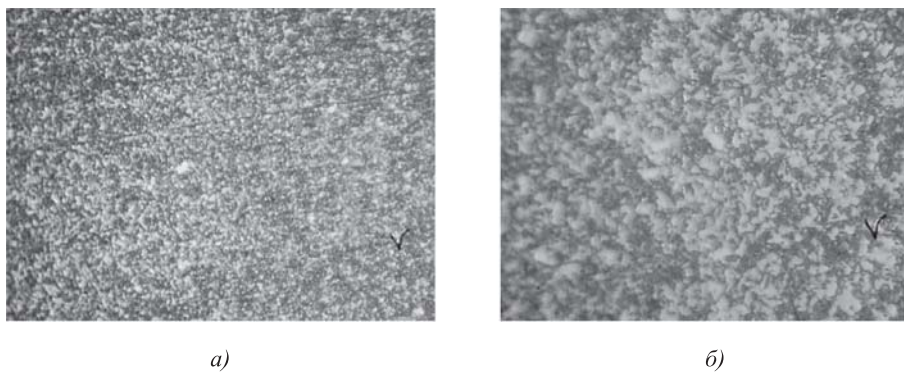


Рис. 4. Микроструктура твердого сплава ВК8 после отжига при температуре 1150 °С, 1339 НВ, износ 0,02 мм:
a — ×640; *б* — ×1280

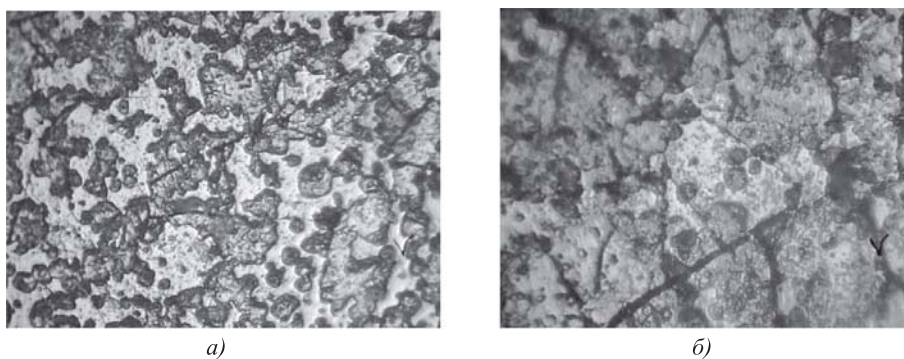


Рис. 5. Микроструктура твердого сплава ВК8 после отжига при температуре 1250 °С, 1452 НВ, износ 0 мм:
a — ×640; *б* — ×1280

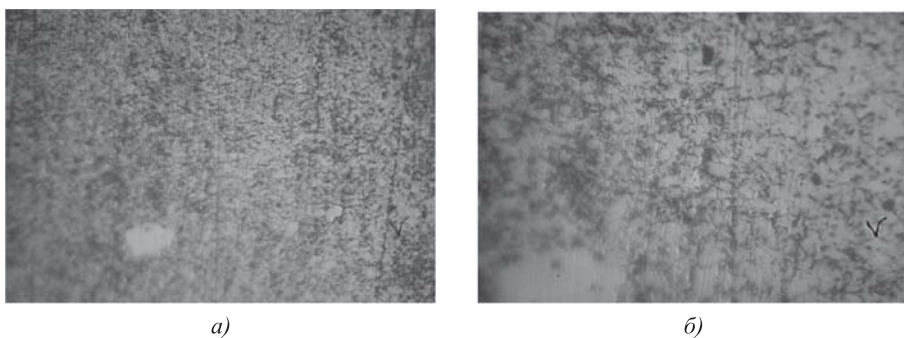


Рис. 6. Микроструктура твердого сплава Т14К8 после отжига при температуре 1050 °С, 1405 НВ, износ 0,1 мм:
a — ×640; *б* — ×1280

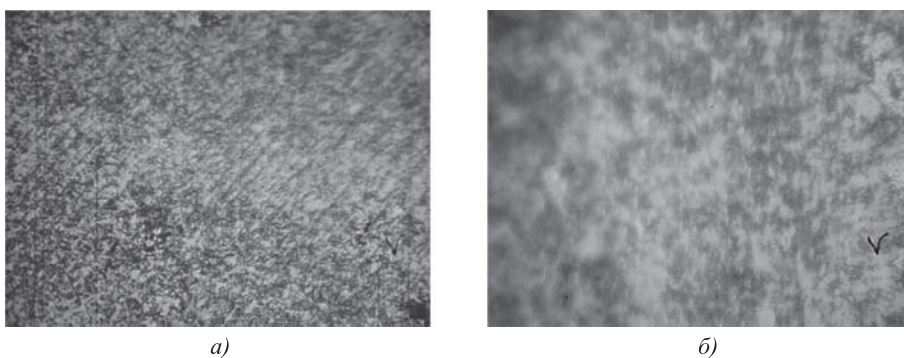


Рис. 7. Микроструктура твердого сплава Т14К8 после отжига при температуре 1150 °С, 1442 НВ, износ 0,2 мм:
a — ×640; *б* — ×1280

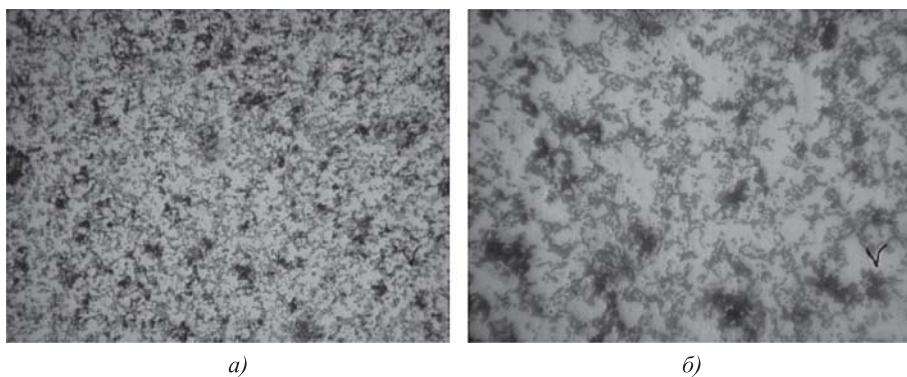


Рис. 8. Микроструктура твердого сплава Т14К8 после отжига при температуре 1250 °С, 1392 НV, износ 0,14 мм:
а — ×640; б — ×1280

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова думка, 1984. 326 с.
2. Богодухов С.И., Гарипов В.С., Козик Е.С., Солосина Е.В. Термическая обработка твердого сплава Т14К8 // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 12. С. 41—44.
3. Пат. 2517093 Российская Федерация, МПК В22 F 3/24. Способ термической обработки режущего инструмента с напаянной твердосплавной пластиной / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик и др.; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). № 2013014370/02; заявл. 09.04.2013; опубл. 27.05.2014, БИ № 15. 5 с.
4. Панов В.С., Чувилин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2001. 428 с.
5. Лошак М.Г. Упрочнение твердых сплавов. Киев: Наукова думка, 1977. 148 с.
6. Пат. 2392342 Российская Федерация, МПК В22 F 3/24. Способ закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова; заявитель и патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. № 2009116915/02; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.05.2011, БИ № 17. 5 с.

Таблица 4

Влияние температуры отжига твердых сплавов ВК8 и Т14К8 на физико-механические и эксплуатационные свойства (время отжига при заданной температуре — 1 ч, время нагрева и охлаждения — 2,5...3,0 ч, вакуум)

Марка материала	Температура отжига, °С	Предел прочности, МПа	Твердость НV	Износ, мм, по грани			
				шлифованной		нешлифованной	
				задняя поверхность	передняя поверхность	задняя поверхность	передняя поверхность
Т14К8	Без отжига	2146	1490	0,40	0,24	0,60	0,10
	1050	1841	1405	0,10	0,18	0,10	0,12
	1150	1907	1442	0,15	0,24	0,20	0,38
	1250	1619	1392	0,16	0,10	0,14	0,20
ВК8	Без отжига	1500	1650	0,25	0,15	0,30	0,15
	1050	2617	1421	0,06	0,06	0,02	0,10
	1150	2312	1339	0,04	0,06	0,02	0,08
	1250	1714	1452	0,02	0,04	Излом	

1250 °С в 2 раза снизился износ шлифовальной грани твердого сплава Т14К8 с 0,24 до 0,1 мм.

Износ твердого сплава ВК8 с повышением температуры отжига уменьшился в 3 раза, что указывает на положительное влияние отжига на износ данного вида сплава.

Выводы

1. Проанализированы результаты проведенных экспериментальных работ по повышению физико-механических и эксплуатационных свойств твердых сплавов групп ВК и ТК.

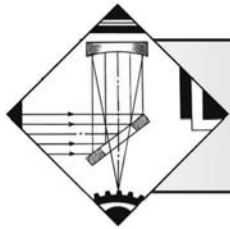
2. Проведена термообработка с нагревом образцов в вакууме при температурах 1050, 1150, 1250 °С. Твердость практически не изменилась и осталась в интервале 1350...1450 НV, предел прочности повысился от 50 до 100 %, износ уменьшился в 2...4 раза.

7. Пат. 2528539 Российская Федерация, МПК В22 F 3/24. Способ получения режущего инструмента из карбидосодержащих сплавов вольфрамовой (ВК) и титано-вольфрамовой (ТК) групп / С.И. Богодухов и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Оренбургский государственный университет (ОГУ). № 2013121411/02; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.09.2014, БИ № 26. 6 с.

8. Guo Zhixing, Xiong Ji, Yang Mei, Jiang Cijin. WC—TiC—Ni cemented carbide with enhanced properties // J. Alloys and Compounds. 2008. Vol. 465. No. 1—2. P. 157—162.

9. Бондаренко В.А., Богодухов С.И. Обеспечение качества и улучшение характеристик режущих инструментов. М.: Машиностроение, 2000. 144 с.

10. Козик Е.С., Шейнин Б.М., Стрижов А.О., Сви-денко Е.В. Влияние режимов термической обработки на свойства твердосплавного режущего инструмента Т14К8 // Вестник ОГУ. 2015. № 1. С. 194—200.



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.793.72

В.А. Лебедев

(Институт электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),

С.А. Лой, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко

(Херсонский филиал Национального университета кораблестроения)

E-mail: lebedevvladimir@ukr.net

Исследование напряженного состояния образцов с напыленным слоем при изгибе

Методом компьютерного моделирования и аналитическим расчетом выполнен анализ напряженного состояния при изгибе в упругой и упругопластической стадиях плоского образца с напыленным слоем, имеющим иные механические свойства (модуль упругости и предел текучести), чем материал подложки. Рассмотрены варианты покрытий меньшей (мягкий слой), нейтральной и большей (жесткий слой) жесткости по отношению к основному металлу с меньшим пределом текучести, при разных соотношениях их толщин. Анализ результатов расчетов показал, что характер распределения нормальных напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении. Наиболее нагруженными точками в сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя и на нижней поверхности подложки. Максимальные нормальные напряжения в напыленном слое и подложке значительно превышают касательные. При этом результаты расчетов по аналитическим формулам, основанным на законах механики твердого тела, и компьютерным моделированием совпадают, что подтверждает адекватность моделирования. На уровень напряжений при неизменной толщине подложки влияют относительная толщина напыленного слоя и его жесткость. Полученные различными методами теоретических исследований результаты позволяют определить направления совершенствования оборудования, технологических приемов выбора режимов, активных материалов для получения напыленных слоев с высоким качеством для узлов и деталей различных конфигураций и разных материалов изделий и напыляемых материалов.

Ключевые слова: напыленный слой, испытания на изгиб, напряженное состояние, упругое и упругопластическое нагружение.

The analysis of stressed state during bending in elastic and elastic-plastic stages of flat sample with sprayed layer having different mechanical properties (modulus of elasticity and yield strength) than the substrate material is performed by computer simulation and analytical calculation. The variants of coatings of small (soft layer), neutral and large (hard layer) rigidity with respect to the base metal, which has lower yield strength, with different ratios of their thicknesses are considered. Analysis of the calculation results showed that the nature of the normal stresses distribution substantially depends on the ratio of the thicknesses of the sprayed layer and the substrate and does not change with their proportional increase or decrease. The most loaded points in the section where the normal stresses reach maximum values are the points on the surface of the sprayed layer and on the bottom surface of the substrate. The maximum normal stresses in the sprayed layer and the substrate significantly exceeds the tangents. At the same time, the results of calculations using analytical formulas based on the laws of solid mechanics and computer simulation are the same, which confirms the adequacy of the modeling. The level of stresses at constant thickness of the substrate is affected by the relative thickness of the sprayed layer and its rigidity. The results obtained by various methods of theoretical researches allow us to determine the directions of improvement of the equipment, technological methods of selection of modes, active materials for obtaining of high quality sprayed layers for units and parts of various configurations and various materials of products and sprayed materials.

Keywords: sprayed layer, bending tests, stressed state, elastic and elastic-plastic loading.

Введение

Для повышения работоспособности и долговечности деталей газовых турбин (в авиадвигателестроении, энергомашиностроении) широко при-

меняют специальные защитные покрытия [1–3]. Эти покрытия должны обладать достаточной пластичностью и прочностью и не растрескиваться под действием механических и термических нагрузок. На разрушение покрытия также большое

влияние оказывают термические напряжения, возникающие при изменении температуры в результате разности коэффициентов линейного расширения подложки и напыленного слоя и напряжения при изгибе, возникающие в процессе изготовления и эксплуатации детали [4—6].

В публикациях, посвященных напряженному состоянию в газотермических покрытиях [7—9], как правило, рассматривается влияние технологических факторов на величину и характер распределения остаточных напряжений и практически отсутствуют данные об их уровне и распределении в образцах при силовом нагружении [10—12]. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов при испытании на термостойкость и отрыв рассмотрены в работах [13—15]. Вместе с тем мало изучено НДС образцов с напыленным слоем при наиболее простом методе испытаний на изгиб, что затрудняет сравнение и обобщение результатов экспериментов, проводимых на образцах из различных материалов подложек и покрытий. Поэтому данная работа, посвященная изучению напряженно-деформированного состояния при изгибе образцов, актуальна.

Цель работы — исследование напряженного состояния при изгибе образцов с напыленными покрытиями и установление количественных зависимостей уровня напряжений от соотношения толщин и свойств материалов покрытия и подложки как в упругой, так и пластической стадии нагружения подложки (основного металла).

Проведение исследований и их результаты

Исследования выполняли аналитическими расчетами (упругая стадия нагружения) и методом компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS (упругое и упругопластическое нагружение). Изучали НДС образцов типа плоской пластины (полосы) с нанесенным на верхнюю поверхность покрытием, которые часто используются при испытаниях [16, 17]. Анализировали поля и эпюры напряжений в упругой и пластической

стадиях работы на образцах с покрытием при нагружении изгибом сосредоточенной силой. Физические и конечно-элементные (КЭ) модели показаны на рис. 1.

Рассматривали два варианта деформирования: вариант упругий, в котором материалы подложки и напыленного слоя деформируются упруго, и вариант упругопластический, в котором в подложке появляются пластические деформации при достижении напряжениями предела текучести.

Длина и ширина физической модели во всех вариантах оставались постоянными: $l = 100$ мм и $b = 20$ мм. Толщину подложки a_2 принимали 1 и 2 мм, при этом толщина напыленного слоя a_1 изменялась в пределах 0,2; 0,4 и 0,6 мм и 0,4; 0,8 и 1,2 мм так, чтобы относительная толщина a_1/a_2 в обоих вариантах толщин подложки оставалась постоянной, равной 0,2; 0,4 и 0,6.

С применением методов математического и компьютерного моделирования [18] изучали три варианта покрытий: меньшей (мягкий слой), нейтральной и большей (жесткий слой) жесткости по отношению к основному металлу. Во всех вариантах упругопластической задачи предел текучести материала покрытия (650 МПа) принимали больше, чем у материала подложки (300 МПа), чтобы пластические деформации развивались только в ней. Коэффициент Пуассона для всех материалов подложек и покрытий принимали равным 0,3.

Принятые при моделировании толщины и физико-механические свойства покрытия и подложки приведены в таблице.

Толщины слоев и свойства материалов

Слой	Толщина слоя a_i , мм	Модуль упругости материала E_i , МПа, покрытия		
		мягкого	нейтрального	жесткого
Подложка	1,0 и 2,0	$2 \cdot 10^5$		
Покрытие	0,4...1,2	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$

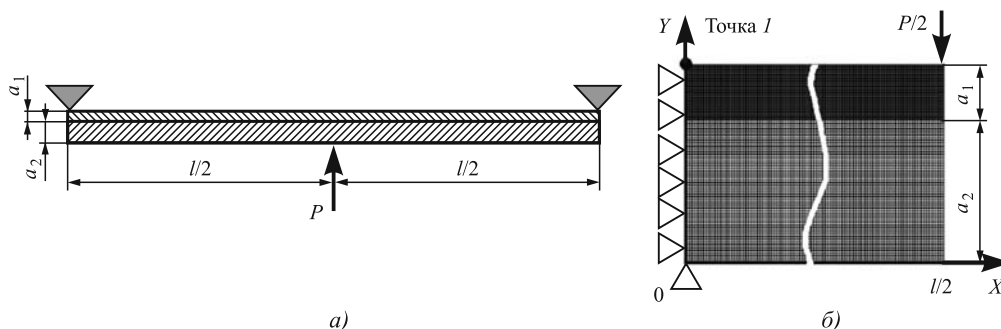


Рис. 1. Схемы физической (а) и КЭ-моделей (б) образца с покрытием

Для оценки адекватности результаты компьютерного моделирования напряжений в образцах с покрытием в упругой задаче сравнивали с аналитическим решением для двухслойной пластины по методике, изложенной в работе [19]. Методика основана на гипотезе плоских сечений и позволяет определить продольные и касательные напряжения на большей части образца, где выполняется гипотеза плоских сечений при упругом деформировании материалов. Для определения напряжений в любой точке сечения образца под действием изгибающего момента M и перерезывающей силы Q в сечении использовали приведенные ниже зависимости.

Нормальные напряжения в любой точке сечения на расстоянии y_i от оси сравнения, расположенной на нижней кромке образца:

$$\sigma_x = \frac{M(y_0 - y_i)E_i}{E_0 I_{x0}}$$

Касательные напряжения в любой точке напыленного слоя:

$$\tau_{xy} = \frac{QE_1(a_1 + a_2 - y_i) \left(\frac{a_1 + a_2 + y_i}{2} - y_0 \right)}{E_0 I_{x0}}$$

и в любой точке подложки:

$$\tau_{xy} = \frac{QE_2 y_i \left(y_0 - \frac{y_i}{2} \right)}{E_0 I_{x0}},$$

где y_0 — ордината упругого центра тяжести двухслойного бруса относительно нижней кромки образца, которая определяется уравнением

$$y_0 = \frac{E_1 a_1 \left(a_2 + \frac{a_1}{2} \right) + E_2 a_2^2 / 2}{a_1 E_1 + a_2 E_2},$$

y_i — ордината точки относительно нижней кромки образца;

E_i — модуль упругости материала, в котором располагается точка;

$E_0 I_{x0}$ — упругий момент инерции сечения двухслойного бруса, который определяется уравнением:

$$E_0 I_{x0} = E_1 a_1^3 / 12 + E_2 a_2^3 / 12 + E_1 a_1 (y_1 - y_0)^2 + E_2 a_2 (y_2 - y_0)^2;$$

E_1 и E_2 — модули упругости материалов напыленного слоя и подложки соответственно.

В рассматриваемой задаче:

$M = Pl/4$ — изгибающий момент в среднем сечении образца;

P — сосредоточенная сила, приложенная по середине пролета;

l — длина пролета (расстояние между опорами).

Аналитический расчет выполнен для образцов (рис. 1, а) с толщиной подложки $a_2 = 1$ и 2 мм, толщина покрытия a_1 при этом изменялась от 0,2 до 0,6 и от 0,4 до 1,2 мм соответственно, так, чтобы относительная толщина покрытия (a_1/a_2) в обоих случаях составляла 0,2; 0,4 и 0,6. Рассчитывали напряжения в покрытии и подложке при изгибающем моменте $M = Pl/4$ и перерезывающей силе $Q = P$. Силу на консоли $P/2$ принимали равной 50 и 200 Н в узлах с толщиной подложки 1 и 2 мм соответственно.

Эпюры напряжений в среднем сечении образца с толщиной подложки 1 мм при упругом нагружении, построенные на основании аналитического расчета (точки) и компьютерного моделирования (линии), приведены на рис. 2.

Анализ результатов расчетов показал, что максимальные нормальные напряжения как в на-

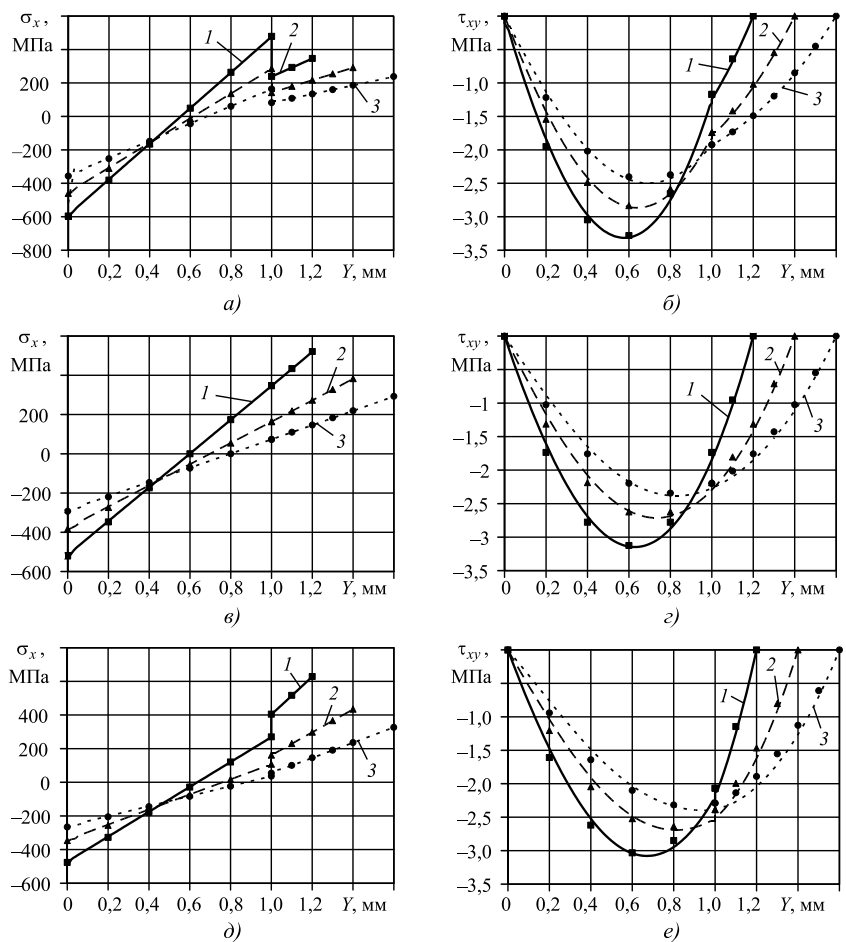


Рис. 2. Эпюры нормальных σ_x (а, в, д) и касательных τ_{xy} (б, г, е) напряжений в среднем сечении при изгибе образцов с мягким (а, б), нейтральным (в, г) и жестким (д, е) напыленными слоями при упругом деформировании:

1 — $a_1 = 0,2$ мм; 2 — $a_1 = 0,4$ мм; 3 — $a_1 = 0,6$ мм

пыленном слое, так и подложке значительно (на 2 порядка) превышают касательные, т.е. именно они являются основной причиной появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке. При этом результаты расчетов по аналитическим формулам, основанным на законах механики твердого тела, и компьютерному моделированию совпадают, что подтверждает адекватность моделирования.

Характер распределения нормальных напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении.

Наиболее нагруженными точками в сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя (точка 1, рис. 1, б) и на нижней поверхности подложки. Значения нормальных напряжений в напыленном слое на границе раздела уменьшаются.

При увеличении приложенной нагрузки напряжения пропорционально (линейно) возрастают, а при увеличении общей толщины образца ($a_1 + a_2$) они уменьшаются — нормальные пропорционально

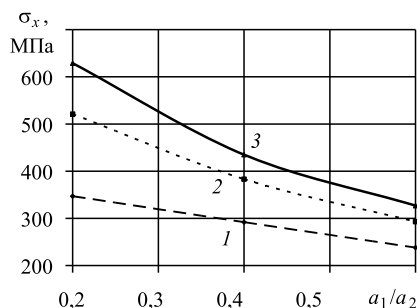


Рис. 3. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от соотношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытии малой (1), нейтральной (2) и большой (3) жесткости при упругом нагружении

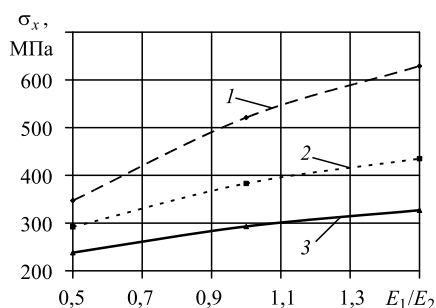


Рис. 4. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от относительной жесткости слоев E_1/E_2 в покрытиях с различной относительной толщиной a_1/a_2 при упругом нагружении: 1 — 0,2; 2 — 0,4; 3 — 0,6

ее квадрату, а касательные линейно. В результате нормальные напряжения остаются неизменными при двукратном увеличении суммарной толщины и четырехкратном увеличении нагрузки, а касательные — при двукратном увеличении суммарной толщины и приложенной нагрузки, при всех вариантах сочетания толщин и жесткостей (модулей упругости) подложки и покрытия.

На уровень нормальных напряжений при неизменной толщине подложки влияет как относительная толщина напыленного слоя, так и его жесткость (рис. 3 и 4).

В исследуемых пределах изменения толщин и жесткостей напыленного слоя и подложки эти зависимости в упругой стадии деформирования с большой точностью описываются следующими уравнениями:

1) от относительной толщины:

— в образцах с жестким напыленным слоем ($E_1/E_2 = 1,5$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(21,5(a_1/a_2)^2 - 32,3a_1/a_2 + 18,2);$$

— с нейтральным напыленным слоем ($E_1/E_2 = 1$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(12(a_1/a_2)^2 - 21a_1/a_2 + 14,4);$$

— с мягким напыленным слоем ($E_1/E_2 = 0,5$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(-5,45a_1/a_2 + 8,02);$$

2) от относительной жесткости (степени мягкости) прослойки:

— в образцах с тонкой прослойкой ($a_1/a_2 = 0,2$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(-2,64(E_1/E_2)^2 + 10,9E_1/E_2 + 2,14);$$

— в образцах со средней прослойкой ($a_1/a_2 = 0,4$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(-1,56(E_1/E_2)^2 + 6E_1/E_2 + 3,24);$$

— в образцах с толстой прослойкой ($a_1/a_2 = 0,6$)

$$\sigma_{x \max} = P/a_2^2(-0,84(E_1/E_2)^2 + 3,46E_1/E_2 + 3,24).$$

Таким образом, при изгибе образцов в упругой стадии увеличение относительной толщины напыленного слоя снижает уровень максимальных напряжений в нем (см. рис. 3). При этом в мягком напыленном слое максимальные напряжения уменьшаются с ростом относительной его толщины линейно, а в жестком — по более сложной зависимости, более интенсивно при малых толщинах и менее интенсивно при больших. С ростом относительной жесткости напыленного слоя повышаются максимальные напряжения в нем (см. рис. 4) более интенсивно при малой относительной его толщине.

При увеличении нагрузки уровень напряжений возрастает и вызывает пластические деформации.

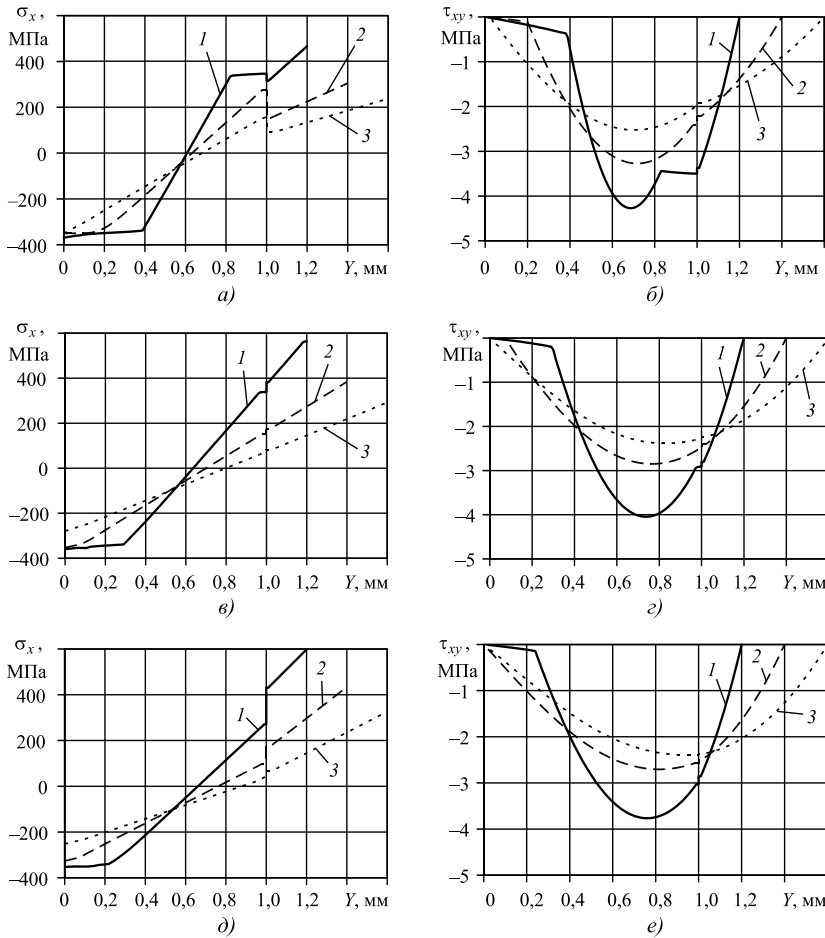


Рис. 5. Эпюры нормальных σ_x (а, в, д) и касательных τ_{xy} (б, г, е) напряжений в среднем сечении при изгибе образцов с мягким (а, б), нейтральным (в, г) и жестким (д, е) напыленными слоями при упруго-пластическом деформировании: 1 — $a_1 = 0,2$ мм; 2 — $a_1 = 0,4$ мм; 3 — $a_1 = 0,6$ мм

Исследование напряженного состояния с учетом пластического деформирования проводили методом компьютерного моделирования на тех же моделях и при тех же нагрузках, при этом пределы текучести подложки и напыленного слоя принимали равными 300 и 650 МПа соответственно, так чтобы при принятых нагрузках пластически деформировался только материал подложки. Модуль упрочнения при пластическом деформировании принят равным $2 \cdot 10^3$ МПа.

Анализ эпюр напряжений (рис. 5) и их сравнение с аналогичными эпюрами при упругом деформировании показывает, что изменения соответствуют общим принципам механики. Эпюры не изменяются во всех вариантах жесткости с относительной толщиной напыленного слоя 0,6, в которых уровень эквивалентных напряжений в подложке при упругом нагружении не превышает предела текучести. В вариантах с меньшей толщиной напыленного слоя в результате повышения на-

пряжений появляются пластические деформации вблизи нижней кромки подложки (толщина напыленного слоя 0,4 мм в вариантах с нейтральной прослойкой) и обеих кромок подложки (в варианте толщины напыленного слоя 0,2 мм). Об этом свидетельствуют горизонтальные участки эпюр.

Появление пластических деформаций в подложке в целом мало изменяет закономерности влияния соотношения толщин слоев и их жесткостей на максимальные напряжения в наиболее загруженной (верхней) точке покрытия (рис. 6 и 7). С увеличением относительной толщины напыленного слоя любой жесткости снижается уровень максимальных напряжений в нем, а с повышением относительной жесткости напыленного слоя любой толщины увеличиваются максимальные напряжения.

Полученные в работе результаты с использованием нескольких методов теоретических исследований напряженного состояния напыленного слоя

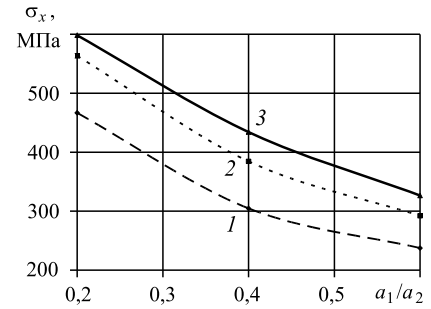


Рис. 6. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от соотношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытиях малой (1), нейтральной (2) и большой (3) жесткости при упругопластическом нагружении

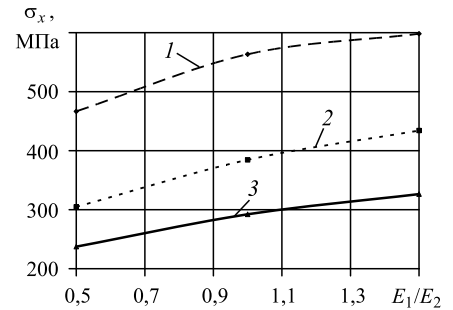


Рис. 7. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от относительной жесткости слоев E_1/E_2 в покрытиях с различной относительной толщиной a_1/a_2 при упругопластическом нагружении: 1 — 0,2; 2 — 0,4; 3 — 0,6

полезны разработчикам оборудования для плазменного напыления, в частности, при создании систем для манипулирования напыляемым изделием с различными геометрическими параметрами, а также технологам, определяющим режимы напыления, материалы и приемы работы, которые обеспечат наиболее качественный конечный результат. Материалы настоящего исследования, совместно с результатами, изложенными в работах авторов [14, 15] в достаточно значимом объеме описывают основные явления напряженного состояния с выводами необходимых зависимостей и могут быть основанием для выработки целенаправленных технологических рекомендаций при напылении конкретных узлов и деталей как для авиационной техники, например лопаток турбин, так и для других видов технических систем, где одним из основных требований является надежность и ресурс.

Выводы

1. Методами аналитического расчета и компьютерного моделирования установлены количественные зависимости напряжений при изгибе образцов с напыленным слоем. Уровень и характер распределения продольных напряжений при изгибе образца с напыленным слоем в упругой стадии могут быть определены аналитическим расчетом, в пластической стадии — компьютерным моделированием.

2. Анализ результатов расчетов показал, что максимальные нормальные напряжения в напыленном слое и подложке значительно (на 2 порядка) превышают касательные, т.е. именно они являются основной причиной появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке.

3. Характер распределения напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении.

4. Наиболее нагруженными точками в среднем сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя и на нижней поверхности подложки.

5. На уровень напряжений при неизменной толщине подложки влияют относительная толщина напыленного слоя и его жесткость. Максимальные напряжения в напыленном слое снижаются с увеличением его относительной толщины и увеличиваются с ростом его относительной жесткости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В.** Современные способы нанесения теплозащитных покры-

тий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 5. С. 38—44.

2. **Pfender L.F.** Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies / Edited by Solonenko O.P.: Cambridge International Science Publishing. Vol. 1: Plasma Torches. Basic Studies and Design. 2003. P. 20—41.

3. **Григорьев С.Н., Ковалев О.Б., Кузьмин В.И. и др.** Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий // Трение и износ. Т. 34. № 3. 2013. С. 221—226.

4. **Лой С.А., Дубовой А.Н.** Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин // Збірник наукових праць УДМТУ. 1999. № 6 (366). С. 105—109.

5. **Лой С.А., Дубовой А.Н.** Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий // Збірник наукових праць УДМТУ. 1999. № 2 (362). С. 68—75.

6. **Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В.** Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1999. 525 с.

7. **Бильченко А.В., Горбач В.Г., Дудка А.И., Любимский А.В.** Термостойкость азотированной стали H26Ю3ТБ // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 120/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. 2011. С. 131—136.

8. **Хаскин В.Ю.** Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытий на стали // Доповіді Національної академії наук України. 2007. № 8. С. 99—102.

9. **Лузан С.А., Кальянов В.Н.** Исследование остаточных напряжений в напыленных покрытиях // Сварочное производство. 1986. № 1. С. 2—4.

10. **Долгов Н.А.** Метод определения модуля упругости газотермических покрытий // Порошковая металлургия. 2004. № 7/8. С. 110—115.

11. **Похмурский В.И., Студент М.М., Довгунык В.М. и др.** Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования // Автоматическая сварка. 2006. № 10. С. 15—19.

12. **Кулик А.Я., Шаронов Е.А., Мезерницкий А.Ю.** Остаточные напряжения в оксидных плазменных покрытиях // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Рига: Зинатне. 1980. Т. 2. С. 12—16.

13. **Куприянов И.Л., Геллер М.А., Горелик Г.Е., Мазовко А.В.** Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на подложку // Физика и химия обработки материалов. 1988. № 3. С. 27—31.

14. **Лебедев В.А., Ермолаев Г.В., Лой С.А., Матвиенко М.В.** Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 11. С. 8—12.

15. **Лебедев В.А., Лой С.А., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В.** Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 8—12.

16. **Kopylov V.** Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties // Восточно-

Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 5 (5). С. 49—57.

17. Зеленина Е.А., Лоскутов С.В., Ершов А.В. Метод расчета физико-механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытаниях образцов на изгиб // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2016. № 2. С. 107—110.

18. Guessasma S., Montavon G., Coddet C. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example // Computational Materials Science. 2004. Vol. 29 (3). P. 315—333.

19. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. и др. Паяння матеріалів: підручник / за загальною редакцією В.Ф. Хорунова та В.Ф. Квасницького. Миколаїв: НУК, 2015. 340 с.

УДК 621.793.74

Е.В. Паничев, В.П. Смоленцев

(Воронежский государственный технический университет)

E-mail: vsmolen@inbox.ru

Подготовка поверхности под нанесение жаростойкого покрытия

Рассмотрен технологический процесс подготовки поверхности под нанесение теплозащитного покрытия на теплонагруженную часть камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя. Предлагаемое покрытие имеет несколько слоев: внутреннее металлоподобное, контактирующее с деталью или подложкой, и внешнее, состоящее из смеси керамических гранул и порошка металла. Для получения исходной поверхности под покрытие с требуемой шероховатостью поверхностного слоя предложено использовать метод струйной обработки абразивным зерном. Проанализированы возможные механизмы формирования переходных зон основа—покрытие, а также влияние их химического состава на адгезионную прочность слоев. Обоснованы выбор марки и сочетания материалов, применяемых для покрытия. Предложены технологические режимы, прошедшие проверку в производственных условиях при нанесении жаростойких покрытий на детали современных ракетных двигателей. Показано влияние режимов нанесения многослойных жаростойких покрытий и характеристик средств технологического оснащения на эксплуатационные показатели изделий. Раскрыто влияние технологических параметров процесса подготовки исходной поверхности и геометрии получаемого микрорельефа подложки на адгезионные характеристики многослойного покрытия, работающего в высокотемпературной зоне камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя.

Ключевые слова: покрытие, абразив, зерно, обработка, микрорельеф, порошок, адгезия.

The technological process of surface preparation for heat-shielding coating on the heat-loaded part of the combustion chamber of liquid rocket engine is considered. The proposed coating has several layers: internal metal, in contact with the part or substrate, and external, from mixture of ceramic granules and metal powder. At the same time, to obtain the initial surface for the coating with the required surface layer roughness, it is proposed to use the abrasive grain blasting method. The possible mechanisms for formation of transition zones base—coating as well as the effect of their chemical composition on the adhesive strength of the layers are analyzed. The choice of brand and combination of materials used for coating is justified. The technological modes that have been tested in production conditions when applying of heat-resistant coatings on parts of modern rocket engines are proposed. The effect of modes for deposition of multilayer heat-resistant coatings and characteristics of technological equipment for the operational factors of products is shown. The effect of the technological parameters of the initial surface preparation process and the geometry of the obtained substrate microrelief on the adhesive characteristics of the multilayer coating operating in the high-temperature zone of the combustion chamber of liquid rocket engines is revealed.

Keywords: coating, abrasive, grain, processing, microrelief, powder, adhesion.

Введение

Современные ракетные системы создаются с учетом многократного использования, что позволяет заметно снижать затраты на последующие пуски. При этом возрастает тепловая нагрузка на огневые стенки камер сгорания (КС) жидкостных

ракетных двигателей (ЖРД), что требует их защиты от многократного термического воздействия и разработки специальных покрытий. Одним из эффективных путей повышения ресурса наиболее теплонагруженных элементов КС является нанесение многослойных жаростойких покрытий [1, 2], обладающих хорошей эрозионной стойкостью и

высоким тепловым сопротивлением в условиях интенсивного воздействия высокотемпературных продуктов сгорания. Определяющей характеристикой таких покрытий является адгезионная прочность сцепления с основой, качество которой зависит от подготовки поверхности детали под покрытие.

Обоснование методов нанесения жаростойких покрытий

Камера сгорания и реактивное сопло (рис. 1) имеют сложный геометрический профиль и работают в условиях значительных перепадов температур и давлений газов, образующихся при сгорании топлива.

Наибольший нагрев испытывает переходная зона смесительной головки (см. рис. 1, справа), где требуется ее эффективная защита от факела пламени при всех пусках двигателя. Один из современных способов нанесения жаростойких покрытий — плазменное напыление в воздушной среде. Технологический процесс плазменного нанесения покрытий, содержащих порошки, включает ряд операций [3, 4] по подготовке поверхности, нанесению подслоя (в случае необходимости) и слоя жаростойкого покрытия, а в ряде случаев — последующую механическую и термическую обработку.

Получаемые покрытия характеризуются следующими показателями, подлежащими контролю для оценки качества горячей зоны двигателя: прочностью сцепления с основой, когезионной прочностью наносимого слоя, равномерностью толщины покрытия, минимальной и регулируемой пористостью, уровнем остаточных напряжений.

Одной из основных характеристик стойкости жаростойких покрытий, нанесенных таким способом, является адгезия к подложке (поверхности

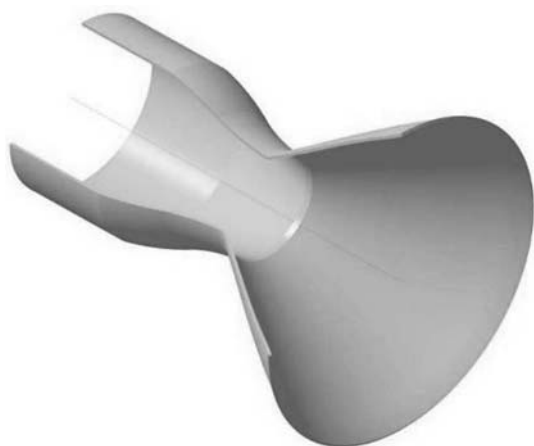


Рис. 1. Внутренний профиль огневой стенки проточной части КС ЖРД

детали). Для ее обеспечения перед нанесением покрытия создают искусственную шероховатость, увеличивающую адгезионную прочность слоев. Для деталей переменного сложного профиля, типа приведенной на рис. 1, обычно применяют абразивно-струйную обработку песком с требуемыми характеристиками, при которой поверхность под покрытие очищается от окисленного поверхностного слоя, загрязнений и масел. Кроме того, создается необходимый микрорельеф с большой высотой микронеровностей, типа приведенных на рис. 2. Обеспечение сцепления покрытий достигается за счет увеличения площади взаимодействия частиц с основой (особенно справедливо для сочетания основы и покрытия, обладающих химическим сродством, например, высоколегированных сталей или хромоникелевых сплавов с нихромом)



а)



б)

Рис. 2. Поверхность проточной части КС после ПСО: а — со стороны смесительной головки; б — со стороны блока сопла

и анкерного зацепления расплавленных частиц с микрорельефом обработанной поверхности изделия (характерно для материалов не образующих химических сплавов, например, хромистой бронзы и нихрома). Площадь активно развитой за счет микрорельефа поверхности, получаемой после пескоструйной обработки (ПСО) детали, в несколько раз больше площади до обработки, что увеличивает адгезионное сцепление покрытия.

При нанесении материалов с резко различающимися свойствами (керамика на металлы, материалы с существенно различными коэффициентами термического расширения) необходимо согласование характеристик покрытия и основы, которое осуществляется напылением подслоя, имеющего промежуточные свойства. Для этого подслой должен быть более легкоплавким и тонким, а также не оказывать существенного воздействия на процессы в контактной зоне при эксплуатации изделия.

Материалы, применяемые для нанесения покрытий

Внутренняя оболочка камеры сгорания и реактивного сопла выполняется из бронзы БрХ0,8, обладающей высокой теплопроводностью и обеспечивающей возможность качественной подготовки поверхностного слоя под нанесение покрытия. Химический состав сплава БрХ0,8 представлен в табл. 1.

Многочисленные эксперименты показали, что в качестве материала покрытия целесообразно использовать: для первого слоя — металлический порошок марки ПХ20Н80, выпускаемый по ГОСТ 13084—88 (химический состав порошка

приведен в табл. 2), для наружного — механическую смесь гранул минералокерамики с металлом, в состав которой входит 80 % минералокерамики ПДЦК-100 и 20 % порошка ПХ20Н80 [1, 4].

Обеспечение качества подготовки поверхности и оценка ее влияния на адгезионную прочность получаемого покрытия

Получаемая адгезионная прочность сцепления покрытия с подложкой зависит от чистоты напыляемой поверхности, ее конфигурации и микрорельефа. Подготовка, как правило, пескоструйная, выполняется путем ударного воздействия на исходную поверхность твердых гранул из электрокорунда, карбида кремния, чугуновой крошки и других материалов. При ударах образуется шероховатый микрорельеф с пластически деформированным слоем. Параметры микрорельефа зависят от характеристик детали, размера и формы гранул, их расхода на единицу поверхности, скорости соударения с основой и угла атаки.

Для получения достоверных результатов испытаний образцов, выполняемых из единого материала детали на одинаковых режимах, изготовили партии образцов (рис. 3) с одинаковым диаметром под напыление (25 мм). Пескоструйную обработку проводили в соответствии с отраслевым стандартом при расстоянии до обрабатываемой поверхности 90 мм и угле атаки подачи абразива 60°. На этих режимах установлено влияние зернистости гранул на адгезионную прочность покрытий.

По результатам первичных испытаний отобрали три типа гранул разной зернистости: из кар-

Таблица 1

Химический состав бронзы БрХ0,8

Содержание элементов, %							
Cu	Cr	Fe	Pb	Zn	Mg	P	Si
		не более					
Основа	0,4...1,0	0,06	0,005	0,03	0,002	0,01	0,05
Примечание. Допускаются примеси никеля до 0,5 % за счет содержания основы.							

Таблица 2

Химический состав порошка ПХ20Н80

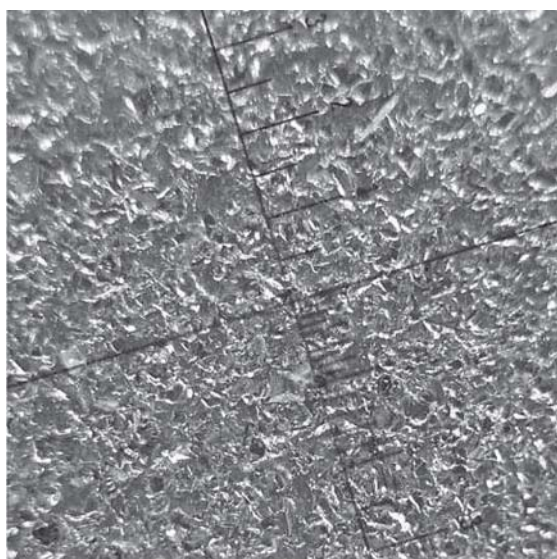
Содержание элементов, %								
Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	S	Ti	Ca
		не более						
Основа	18,0...22,0	0,3	0,06	0,1	0,05	0,01	0,08	0,2



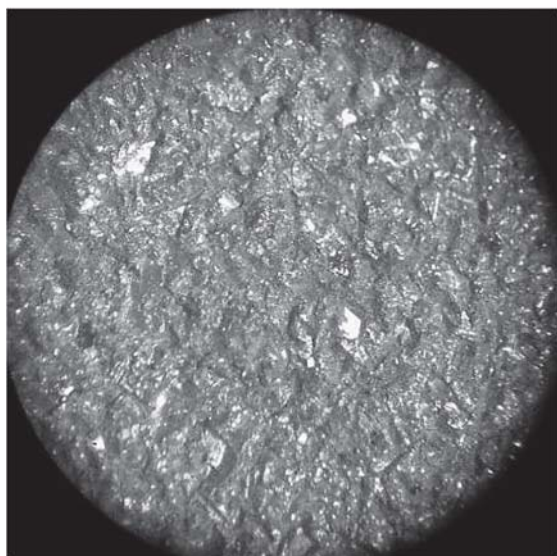
Рис. 3. Образцы для контроля адгезионной прочности покрытия

бида кремния черного марки 54С с зернистостью F20 и F46, а также электрокорунда белого с зернистостью F30.

Структуру и микроструктуру материалов после пескоструйной обработки исследовали на поперечных шлифах. По результатам металлографических исследований выявлены отдельные микродефекты в виде единичных вкраплений абразива в медную основу. Установлено, что с увеличением размеров гранул возрастают количество таких дефектов, их размер и протяженность. Кроме того, при использовании для пескоструйной обработки шлифовального зерна с гранулами большей фракции значительно увеличивается шероховатость



а)



б)

Рис. 4. Поверхность после ПСО:
а — $\times 10$; б — $\times 25$

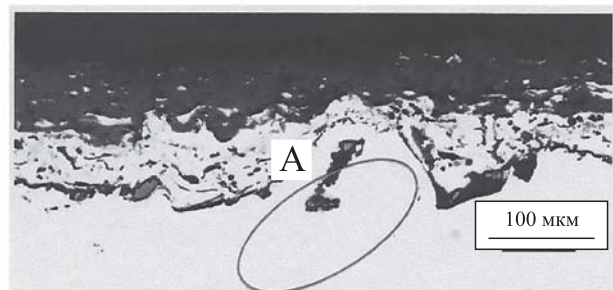
тость обработанной поверхности, что может привести к выдавливанию медной основы над гранулами абразива. Это формирует нежелательный исходный профиль поверхности (рис. 4) для нанесения покрытия с большей высотой неровностей, нарушающих равномерность расположения выступов и ухудшающих адгезионную прочность покрытия. На рис. 4, а просматриваются местные выступы большой высоты, снижающие эффективную площадь контакта слоев покрытия. При большем увеличении (рис. 4, б) видно, что часть выступов может превышать толщину наружных слоев. Это может вызвать прогорание защитного покрытия, выход из строя двигателя после многократных пусков изделия.

Поверхности поперечных шлифов на рис. 5, а получены пескоструйной обработкой карбидом кремния с мелким размером частиц (зернистость F46). На этих образцах для промежуточного слоя достигнута требуемая равномерность толщины слоя по всему шлифу. Для сравнения на рис. 5, б показан промежуточный слой, полученный в результате обработки образцов порошком карбида кремния с крупными гранулами (зернистость F20), где видна неравномерность толщины слоя и появились гранулы карбида кремния в толще основного материала (выделено отдельным участком).

Для выявления источников возникновения включений поверхность поперечных шлифов исследовали на сканирующем растровом микроскопе. На рис. 6 приведена фрактограмма поперечного



а)



б)

Рис. 5. Микрошлиф образца с покрытием ($\times 100$):
а — ПСО зерном SiC F46; б — ПСО зерном SiC F20

Таблица 3

Влияние режимов пескоструйной обработки на появление включений

Количество включений, %	Материал абразива	Зернистость	Число проходов	Расстояние от среза сопла, мм	Давление, МПа
15	SiC	F20	2	90	0,5
18	Al ₂ O ₃	F30	3		0,6
11	SiC	F46	2		0,5

Примечание. Угол атаки 60°.

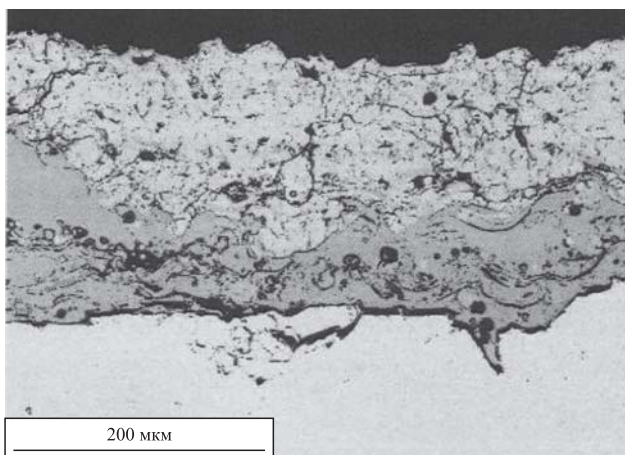


Рис. 6. Фрактограмма образца с покрытием (в режиме вторичных электронов)

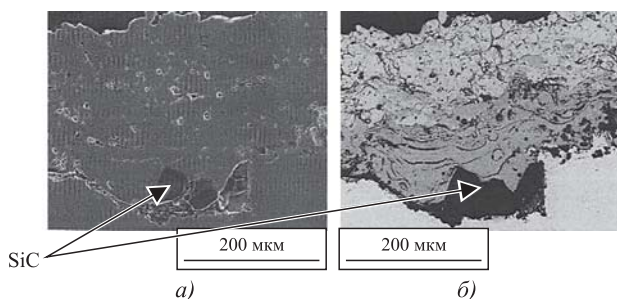


Рис. 7. Поперечный микрошлиф образца с покрытием (×300): а — съемка в режиме отраженных электронов; б — съемка в режиме вторичных электронов

сечения шлифа образца с керметным покрытием и нихромовым подслоем на медной подложке, обработанной карбидом кремния зернистостью F46. На поверхности шлифа образца, между медной подложкой и нихромовым подслоем, имеется участок протяженностью 170 мкм, который первоначально идентифицировался как пора, но исследование в режиме отраженных электронов установило, что это включение карбида кремния, полученное в результате абразивно-струйной обработки. На рис. 7 приведены поперечные микрошлифы образцов с покрытием при увеличении ×300. Использовали наиболее достоверные варианты съемки: в режимах отраженных и вторичных электронов. На всех шлифах четко просматривается наличие и размещение включений. В процессе испытаний выявлено, что появление таких включений способно вызывать местные неровности покрытия, поэтому необходимо прогнозировать наличие гранул в поверхностном слое подложки. Для этого проведено исследование состава и количества включений для различных режимов обработки и материалов покрытия, наносимых на материал детали (БрХ0,8)

абразивно-струйным методом гранулами различной зернистости (табл. 3).

Исходя из полученных результатов, рациональными являются режимы с меньшими числом проходов и давлением. Рекомендуется применение абразивного материала, более стойкого к разрушению при соударении с поверхностью. Это снижает его количество в подложке, что можно объяснить меньшей плотностью электрокорунда, и, соответственно, меньшим импульсом давления частиц абразива при соударениях.

Для образцов (см. табл. 3) проведены измерения параметров шероховатости поверхности образцов, полученные результаты показаны на рис. 8 и в табл. 4.

Анализ профилограмм (см. рис. 8) образцов показывает снижение высоты неровностей

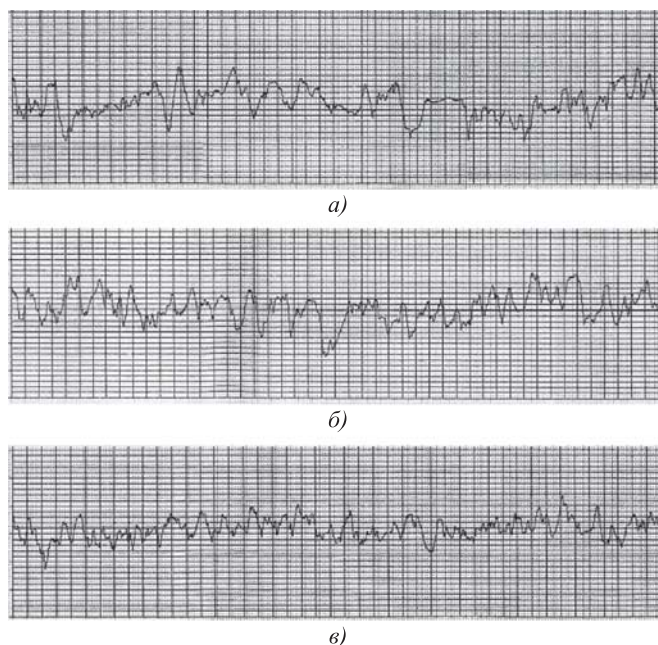


Рис. 8. Профилограммы поверхностей образцов после ПСО: а — SiC F20; б — Al₂O₃ F30; в — SiC F46

Таблица 4

Результаты измерения параметров шероховатости поверхности

Зернистость	Материал абразива	Ra , мкм	Rz , мкм	R_{max} , мкм
F20	SiC	$16,2 \pm 2,3$	$98 \pm 11,6$	$125 \pm 7,9$
F30	Al_2O_3	$13,1 \pm 1,5$	$66,8 \pm 8,3$	$81,8 \pm 8,1$
F46	SiC	$7,1 \pm 0,8$	$39,3 \pm 2,7$	$49,5 \pm 5,7$

Таблица 5

Результаты испытаний образцов на адгезионную прочность покрытий

Зернистость	Материал			Адгезионная прочность, МПа
	абразива	подслоя	покрытия	
F20	SiC	ПХ20Н80	ДЦН 80/20	9,52
F30	Al_2O_3			9,01
F46	SiC			11,09

с уменьшением фракции применяемого абразивного материала. При этом заметно уменьшается неравномерность выступов на поверхности, что положительно влияет на эксплуатационные характеристики деталей с покрытием, в частности защищает от местных прогаров покрытия.

Также на образцах (см. рис. 3) проводили испытания адгезионной прочности наносимого на полученную поверхность покрытия. Для оценки влияния получаемого микрорельефа на адгезионную прочность покрытия использовали клеевой метод испытания на отрыв [3]. Метод доступен и дает удовлетворительные результаты для сравнительных испытаний. Для этого к образцам пленочным клеем ВК-3А приклеивали изготовленный из стали 12Х18Н10Т сопряженный образец равного диаметра с подготовленной на тех же режимах абразивно-струйной обработкой контактной поверхностью. Испытания проводили со скоростью нагружения 20 мм/мин.

В процессе испытаний в момент отрыва покрытия от основы фиксируют силу отрыва P . Принято, что прочность сцепления прямо пропорциональна силе отрыва и обратно пропорциональна площади образца диаметром d . Численные значения адгезионной прочности σ_{cc} оценивали по формуле

$$\sigma_{cc} = 4P/\pi d^2.$$

Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Полученные значения адгезионной прочности, с учетом приведенных выше рекомендаций по

выбору параметров шероховатости и абразивного материала, дают основания утверждать:

— с увеличением в основе количества материала абразива адгезионная прочность покрытия снижается из-за уменьшения контактной поверхности, обеспечивающей образование анкерных зацеплений напыляемого порошкового материала (особенно характерно для электрокорунда с зернистостью F30, рис. 8, б);

— увеличение высоты микронеровностей, получаемых при обработке карбидом кремния с зернистостью F20 (рис. 8, а) не позволяет существенно увеличить адгезионную прочность покрытия. Это можно объяснить увеличением шага неровностей профиля до значений, превышающих размеры напыляемых порошковых материалов, что, как следствие, приводит к снижению эффекта анкерного механизма зацепления частиц порошка в неровностях микрорельефа;

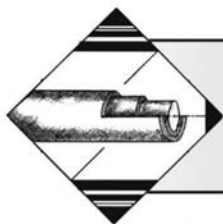
— получение однородной поверхности (характерной для обработки карбидом кремния с зернистостью F46, рис. 8, в) с меньшим значением местного шага неровностей профиля относительно соответствующих размеров гранул напыляемого порошкового материала позволяет получить повышенные показатели адгезионной прочности, а также лучшую равномерность слоя по толщине покрытия.

Заключение

Проведенные исследования и полученные в ходе работы результаты позволили установить степень влияния состава материалов покрытия и режимов обработки на адгезионную прочность наносимого покрытия. Установлено, что требуемая высота неровностей исходной поверхности достигается в основном с применением гранул зернистостью F46. Исходя из полученных данных для пластичных материалов (например, хромистой бронзы БрХ0,8) оптимальным является использование абразивного материала с высокой стойкостью при соударениях. В результате для получения высокой адгезии требуются меньшее число проходов и давление для подачи среды на поверхность детали под покрытие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973. 398 с.
2. Балдаев Л.Х. Геотермическое напыление. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
3. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
4. Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Иванов В.В. Проектирование технологических процессов получения высокоресурсных комбинированных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 6. С. 273–281.



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9.025

В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, О.И. Морозов, А.С. Алешин, М.Ф.Д. Аль Кадхими
(Ульяновский государственный технический университет),

Д.И. Сагитов

(Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева)

E-mail: vpt@ulstu.ru

Моделирование процесса предварительной механической активации подложки композиции покрытие—металл и исследование напряженного и деформированного состояния рабочих поверхностей штампового инструмента*

Разработаны физическая и расчетная модели процесса холодного пластического деформирования образцов из инструментальной теплостойкой стали X12M. Представлена методика изучения влияния холодной пластической деформации на адгезионную способность системы подложка—покрытие.

Ключевые слова: штамп, пресс-форма, механическая активация, деформация, износостойкость, покрытие, ионно-плазменное напыление, адгезия.

Physical and computational models are developed for the cold plastic deformation process of specimens from Kh12M heat-resistant tool steel. Technique for studying of the effect of cold plastic deformation on the adhesive ability of the substrate—coating system is presented.

Keywords: die, die mould, mechanical activation, deformation, wear resistance, coating, ion-plasma deposition, adhesion.

Введение

Актуальность исследования заключается в создании новой технологии получения износостойких покрытий на модифицированной рабочей поверхности инструмента, в подборе режимов обработки и проектировании рабочего инструмента штампов листовой, холодной объемной и горячей штамповки из полутеплостойких и теплостойких сталей повышенной вязкости, а также пресс-форм. В настоящее время методы поверхностной модификации реализованы лишь в технологии повышения стойкости режущего инструмента (резцы, сверла и др.) и не являются эффективными для повышения стойкости пуансонов и матриц в процессах обработки металлов давлением, где необходимо производить комплексную модифи-

кацию системы подложка—покрытие. Пуансоны и матрицы штампов работают в сложных условиях нагружения: наличие ударных, знакопеременных нагрузок; наличие особенностей сил трения между обрабатываемым материалом и инструментом и температурных режимов обработки.

Сущность предлагаемой технологии, разработанной в Ульяновском государственном техническом университете, состоит в комплексной модификации поверхностного слоя: предварительной механической активации и нанесении упрочняющих покрытий ионно-плазменным методом. При ее реализации наблюдаются существенное повышение адгезии системы подложка—покрытие, снижение теплопроводности и разупрочнения металла поверхностного слоя штампа. Наблюдаемый эффект обусловлен искажением кристаллической решетки металла, повышением плотности дислокаций при пластическом деформировании. Использование комплексной (механическая активация + упрочняющее покрытие) поверхностной модификации позволит значительно повысить

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант номер 18-48-730011).

стойкость, увеличить ресурс рабочих деталей штампов и пресс-форм.

Технология повышения стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей с использованием комплексной модификации заключается в следующем:

1. Предварительно проводится холодное пластическое деформирование обрабатываемой поверхности металлопроката любым традиционным способом (валками, ударным воздействием между бойками и др.). На этом этапе формируется благоприятная текстура (макро- и микроструктура), происходит активация и механический наклеп (деформационное упрочнение) в области рабочей зоны.

2. Окончательная модификация поверхностного слоя происходит при нанесении на упрочненную рабочую поверхность износостойкого многослойного покрытия методом ионно-плазменного напыления.

Основные виды материалов, которые могут быть использованы при реализации разрабатываемой технологии — группа теплостойких и полутеплостойких инструментальных сталей, обладающих теплостойкостью более 500 °С и сохраняющих свои физико-механические характеристики при температурах выше 300...400 °С, что делает возможным их применение в качестве материала подложки при нанесении покрытий методом ионно-плазменного напыления. Допустимые габаритные размеры образцов обычно определяются размерами рабочей зоны установки "Булат" для нанесения износостойких покрытий и составляют 200×200×200 мм.

Для повышения эффективности процесса адсорбции в ряде публикаций зарубежных авторов предложено использовать механическую деформацию, заключающуюся в механической активации металла при реализации схемы одноосного сжатия заготовки [1—4]. На основании проведенных авторами экспериментальных работ была предложена физическая модель, которая объединяет механическую деформацию с энергией свя-

зи между элементами рассматриваемой системы: подложка (выполняющая функции катализатора) и покрытие (выполняющая функцию реагента).

Установлено, что для повышения эффективности адсорбции необходимо уменьшить энергию активации в продольном направлении кристаллической решетки (ее растяжение), что соответствует эффекту, создаваемому механической одноосной деформацией сжатия [1—3].

На рис. 1 представлена физическая модель структурирования системы подложка—покрытие (фрагмент кристаллической решетки подложки) при комплексном модифицировании (холодная пластическая деформация с последующим ионно-плазменным напылением), позволяющая иллюстрировать повышение эффективности процесса адсорбции частицами вещества покрытия (реагента) на подложку.

Как установлено в работах [1, 3], возникающее механическое напряжение увеличивает силу связи между элементами системы подложка—покрытие, что является результатом "стягивания" атомов металла подложки при некоторой величине деформации поверхности подложки.

На основании литературных источников были проанализированы результаты механических испытаний на растяжение стали X12M (ГОСТ 5950—2000) и использована диаграмма испытания на растяжение (максимальное значение предела прочности σ_b составило 1422 МПа, среднее 1364 МПа), представленная на рис. 2.

Для более точной верификации параметров материала при создании модели были использованы результаты исследования А.Д. Хвана [8], согласно которому для стали X12M по результатам испытаний на сжатие цилиндрических образцов была построена кривая течения (рис. 3) в координатах: интенсивность напряжений (σ_j)—интенсивность деформаций (ϵ_j).

Экспериментальные испытания (осадка образцов-следов) проводили на гидравлическом прессе (номинальная сила прессы 1500 кН), материал

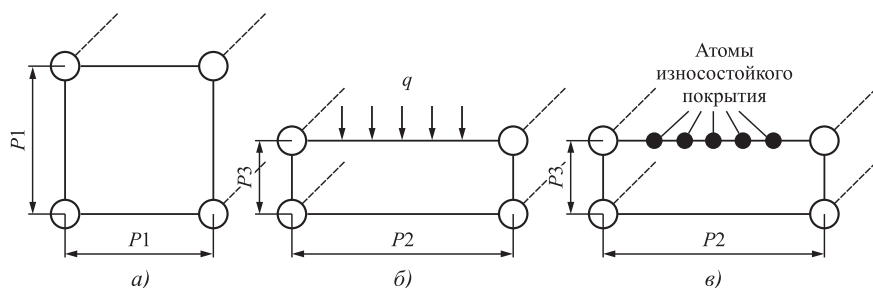


Рис. 1. Физическая модель структурирования системы подложка—покрытие при комплексном модифицировании поверхностного слоя:

a — исходная структура (период P_1); *б* — деформированная структура — одноосное сжатие ($P_2 > P_1$, $P_3 < P_1$); *в* — модифицированная структура системы подложка—покрытие

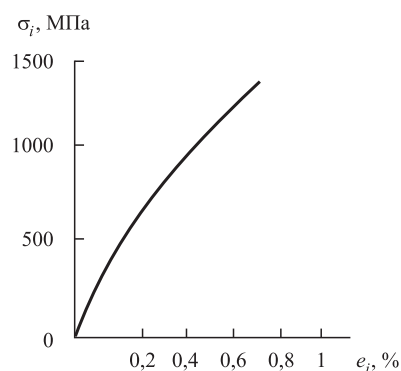


Рис. 2. Диаграмма испытаний на растяжение образцов из стали X12M

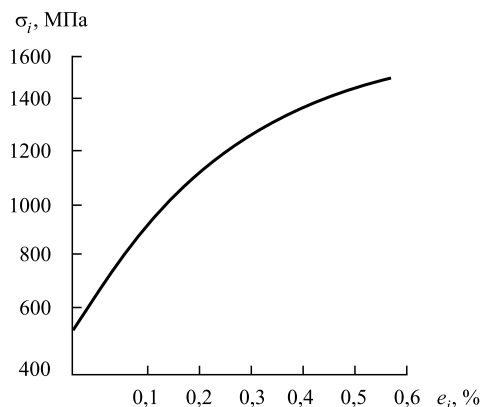


Рис. 3. Кривая течения стали X12M

Режимы экспериментальных исследований при одноосном сжатии образца из стали X12M

Исходные габаритные размеры образца, мм			Сила деформирования F , кН	Давление деформирования p , МПа	Габаритные размеры осажённых образцов, мм			Степень деформации при одноосном сжатии ϵ , %
a	b	S_0			a_1	b_1	S	
10	10	5	90	882,6	11	11	4,2	17
			150	1470,9	12	12,5	3,6	28
			200	1961,3	12,5	13	3,1	38
			250	2451,6	13	13,5	2,7	47
			300	2941,9	14	14	2,2	59

образцов — полутеплостойкая инструментальная сталь X12M, исходные размеры образцов $a \times b \times s_0 = 10 \times 10 \times 5$ мм, режимы эксперимента представлены в таблице.

По результатам механических испытаний по схеме осадки были получены образцы-следы (рис. 4).

Методика исследования адгезионной способности системы подложка—покрытие

После механической активации на образцы было нанесено износостойкое покрытие — нитрид титана — на установке типа "Булат", используемой в лаборатории износостойких покрытий УлГТУ.

Была разработана методика исследования процесса комплексного упрочнения поверхностного слоя рабочего инструмента, блок-схема которой приведена на рис. 5.

На предварительно осажённые образцы ($\epsilon = 17...59$ %) после подготовки поверхности (полирования алмазными пастами АСМ различной зернистости) было нанесено износостойкое покрытие на основе нитрида титана: толщина покрытия 3...4 мкм; температура нанесения 480 °С. Деформированные образцы с нанесённым износостойким покрытием показаны на рис. 6.

В качестве параметра, оценивающего повышение стойкости поверхностного слоя образцов, был выбран коэффициент отслоения K_0 , уменьшение которого свидетельствует о повышении прочности адгезии покрытия с инструментальной основой. Для оценки коэффициента отслоения использовали устройство, фиксирующее минимальную силу сжатия пружин на момент нарушения сплошности защитного покрытия (отслоение) [9].

Для изучения характера напряжённого и деформированного состояния тела в процессе предварительной холодной пластической деформации была разработана математическая модель процесса холодного пластического деформирования (механической активации) с использованием программного пакета LS-Dyna, представлен анализ адекватности полученной модели. Блок-схема моделирования процесса осадки образцов-следов представлена на рис. 7.

Программная среда LS-Dyna — многоцелевая программа, предназначенная для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Она включает в себя полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формообразования.

Моделирование состояло из трех основных этапов: препроцессорная подготовка, решение задачи, постпроцессорная обработка.

Препроцессорная подготовка включала в себя создание геометрической и конечно-элементной модели процесса, определение типов элемента, моделей материала, контактных параметров процесса, введение ограничений и нагрузок, действующих на модель, определение времени расчета и

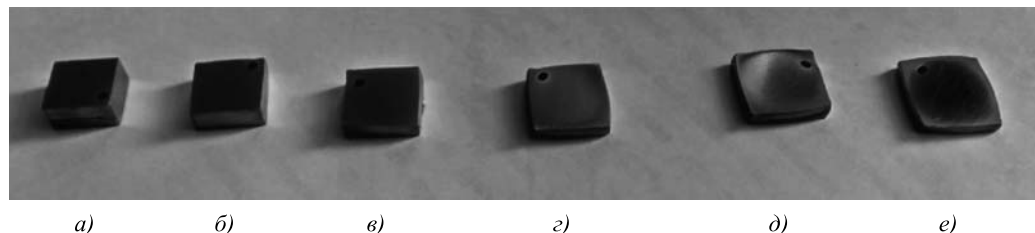


Рис. 4. Образцы-следы, осажённые с разной степенью деформации:

$a - \epsilon = 0$ %; $b - \epsilon = 17$ %; $в - \epsilon = 28$ %; $г - \epsilon = 38$ %; $д - \epsilon = 47$ %; $e - \epsilon = 59$ %

всех других необходимых параметров для выполнения расчета.

При работе с программой LS-DYNA требовалось вводить значения напряжений и деформаций в виде истинных напряжений и деформаций. При малых деформациях значения расчетных и

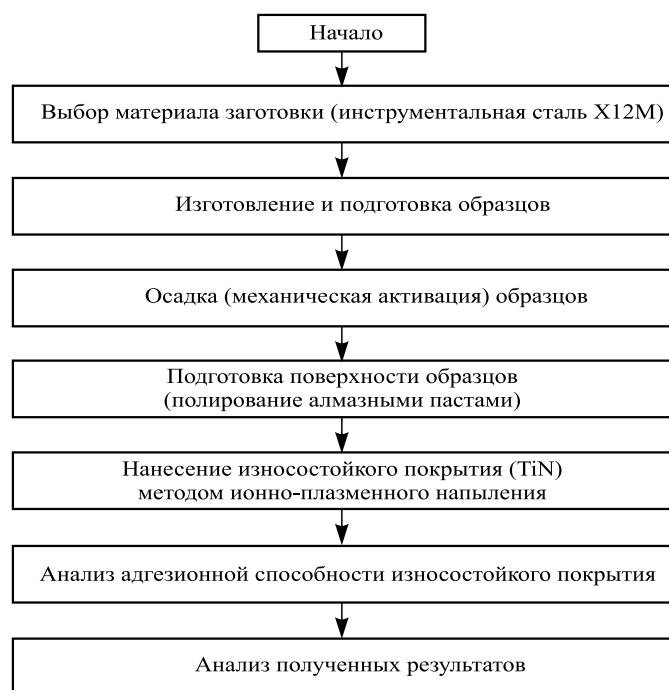


Рис. 5. Блок-схема методики исследования комплексной модификации поверхностного слоя



Рис. 6. Образцы с нанесенным покрытием TiN



Рис. 7. Блок-схема моделирования процесса осадки

истинных параметров практически идентичны. Однако по мере возрастания деформаций эти значения существенно расходятся. Для получения данных о пластичности материала использовалась кривая деформирования после одноосного растяжения (см. рис. 2) [5–7].

Для создания конечно-элементной модели данных была составлена блок-схема построения модели в программе LS-Dyna (рис. 8).

В результате проведенного моделирования была создана модель процесса осадки образца с габаритными размерами, соответствующими образцам, осажденным в процессе натурального эксперимента, определены и заданы физико-механические харак-



Рис. 8. Блок-схема процесса создания конечно-элементной модели в среде LS-Dyna

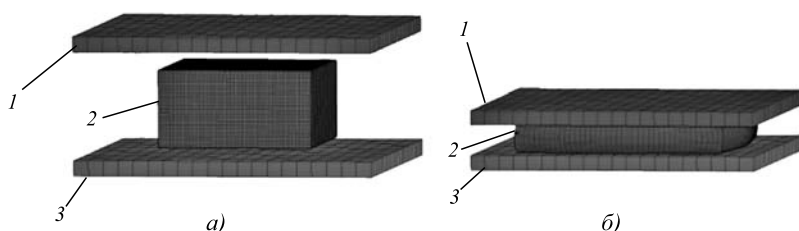


Рис. 9. Модель процесса осадки, выполненная в программе LS-Dyna:
a — до деформации; *б* — в процессе деформации; 1 — верхний боек; 2 — заготовка; 3 — нижний боек

теристики, тип и параметры материала, тип контакта, скорость осадки, карты движения бойков и время завершения процесса осадки. Разработанная модель процесса осадки представлена на рис. 9.

В качестве параметра, оценивающего адекватность физической модели осадки реальным результатам, была выбрана зависимость, полученная по результатам моделирования и натурального эксперимента, силы осадки от степени деформации. При обработке результатов значений эксперимента и расчета в программе MS Excel была проведена аппроксимация зависимостей, графическая интерпретация которых представлена на рис. 10. При этом среднестатистические значения отклонения результатов не превышают 15 %, что свидетельствует об адекватности принятой модели.

Погрешности расчета могут быть снижены путем увеличения участвующих в расчете элементов и, соответственно, времени расчета модели.

Полученная модель, как видно из рис. 10, корректно отображает результаты натурального эксперимента (расхождение кривых по значению ΔF не превышает 50...70 кН). Рост ΔF при деформациях, превышающих 40 %, происходит в результате упрощений программного расчета, вызванных увеличенным масштабом конечно-элементной сетки. Результаты моделирования процесса осад-

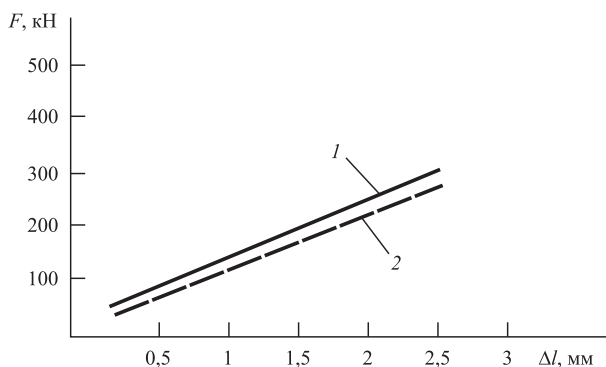


Рис. 10. График зависимости силы F от степени деформации Δl :

1 — аппроксимированная кривая, полученная по результатам моделирования в среде LS-Dyna; 2 — аппроксимированная кривая, полученная в результате эксперимента

ки представлены на рис. 11 (см. обложку).

Анализ изображений на рис. 11 (*a—e*) позволяет сделать вывод о характере нагружения в процессе осадки, а также о распределении и величине напряжений. Максимальные напряжения возникают по границам деформируемого образца (угловые концентраторы напряжений), причем с увеличением скорости нагружения и силы осадки интенсивность роста напряжений повышается, что подтверждает корректность разработанной физической модели.

Результаты моделирования

Установлено, что в процессе механической активации подложки наблюдается изменение энергии в материале заготовки. На рис. 12 представлены результаты изучения кинетической и потенциальной энергии в материале образцов в процессе деформации по схеме одноосного сжатия в программе LS-Dyna. Резкий скачок кинетической энергии до максимального значения характеризуется началом резкого течения металла. Дальнейшее изменение обусловлено поэтапным уплотнением зерен в процессе деформационного упрочнения. С течением времени течение металла уменьшается, поэтому изменение амплитуды кинетической энергии снижается.

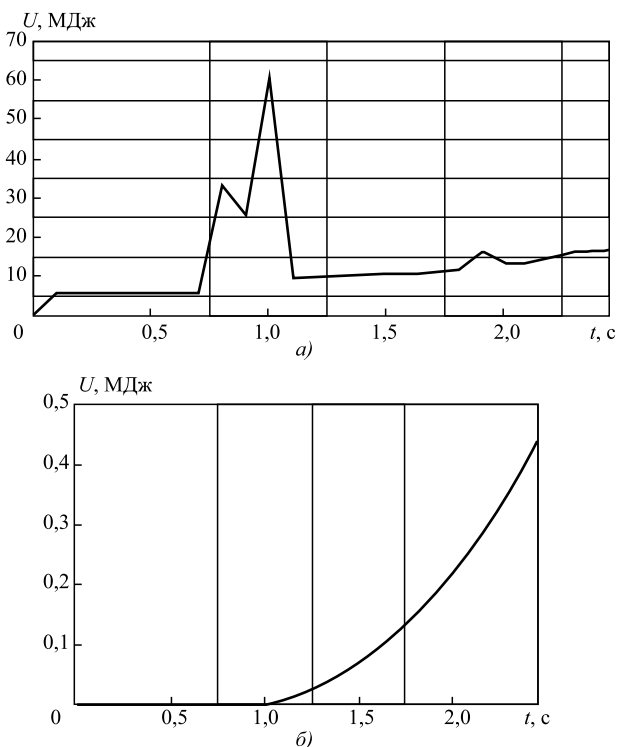


Рис. 12. Графики изменения кинетической (*a*) и потенциальной (*б*) энергии заготовки в процессе деформации

Замедление роста потенциальной энергии также связано с тем, что для начала деформации необходимо достижение напряжений, превышающих предел текучести металла. Дальнейший рост энергии обусловлен увеличением плотности дислокаций материала заготовки и необходимой для его деформирования силой.

Анализ данных, полученных в программе LS-Dyna, позволяет сделать вывод о характере нагружения в процессе осадки, а также об увеличении растягивающих напряжений приконтактной поверхности материала заготовки (до $1,6 \cdot 10^3$ МПа), что соответствует представленной физической модели, при которой наблюдается уменьшение энергии активации в продольном направлении кристаллической решетки (ее растяжение). Максимальные напряжения возникают по границам деформируемого образца (угловые концентраторы напряжений), причем с увеличением скорости нагружения и силы осадки интенсивность роста растягивающих напряжений на приконтактной поверхности повышается, что подтверждает корректность разработанной физической модели.

Заключение

Таким образом, разработаны методика проведения исследования и технология повышения стойкости поверхностного слоя, произведен подбор материалов и типоразмеров обрабатываемых образцов, разработаны физическая и расчетная модели процесса холодного пластического деформирования образцов из инструментальной теплоустойчивой стали X12M, установлены адекватность данной модели и возможность использования программных сред для изучения особенностей и режимов холодного пластического деформирования. Исследования предполагается продолжить.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **How** strain can break the scaling relations of catalysis. Alireza Khorshidi, James Vio-let, Javad Hashemi & Andrew A. Peterson // *Jornal Nature Catalysis*. 2018. Vol. 1. P. 263–268.
2. **Wang H. et al.** Direct and continuous strain control of catalysts with tunable battery electrode materials. 2016. No. 354.
3. **Agrawal P.M., Rice B.M., Thompson D.L.** Predicting trends in rate parameters for self-diffusion on fcc metal surfaces. *Surf.* 2002. No. 515. P. 21–35.
4. **Ray Browell, Dr. Guoyo Lin.** The power of nonlinear materials capabilities // *Ansys solutions*. 2000. No. 1. Vol. 2.
5. **Чернявский А.О.** Метод конечных элементов. Основы практического применения. М.: Машиностроение, 2003. 24 с.
6. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.** Ansys в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
7. **Фридман Я.Б.** Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974.
8. **Хван А.Д., Хван Д.В., Осинцев А.П.** Повышение стойкости инструментальной стали X12M // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т. 8. № 5. С. 131–134.
9. **Пат. 37221 РФ.** Устройство для испытания покрытия на отслоение / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов, А.В. Филимонов. № 2003135362/20; заявл. 09.12.2003; опубл. 10.04.2004, Бюл. № 10.
10. **Табак В.П.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 122 с.
11. **Табак В.П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
12. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
13. **Табак В.П., Сагитов Д.И.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 197 с.

ВНИМАНИЕ!

В журнале "Упрочняющие технологии и покрытия" № 9 за 2019 г. на стр. 429 допущена ошибка в библиографическом списке в источнике литературы № 2. Правильный вариант: 2. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор *Копова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 16.09.2019 г. Подписано в печать 30.10.2019 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru